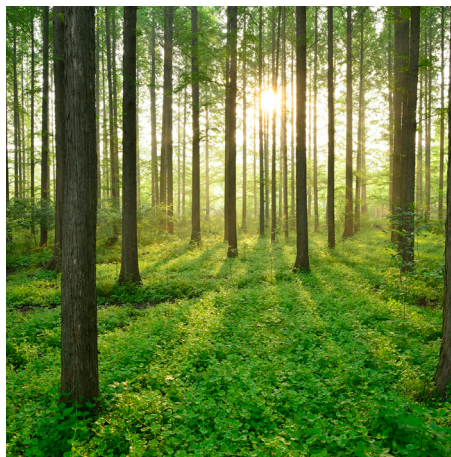
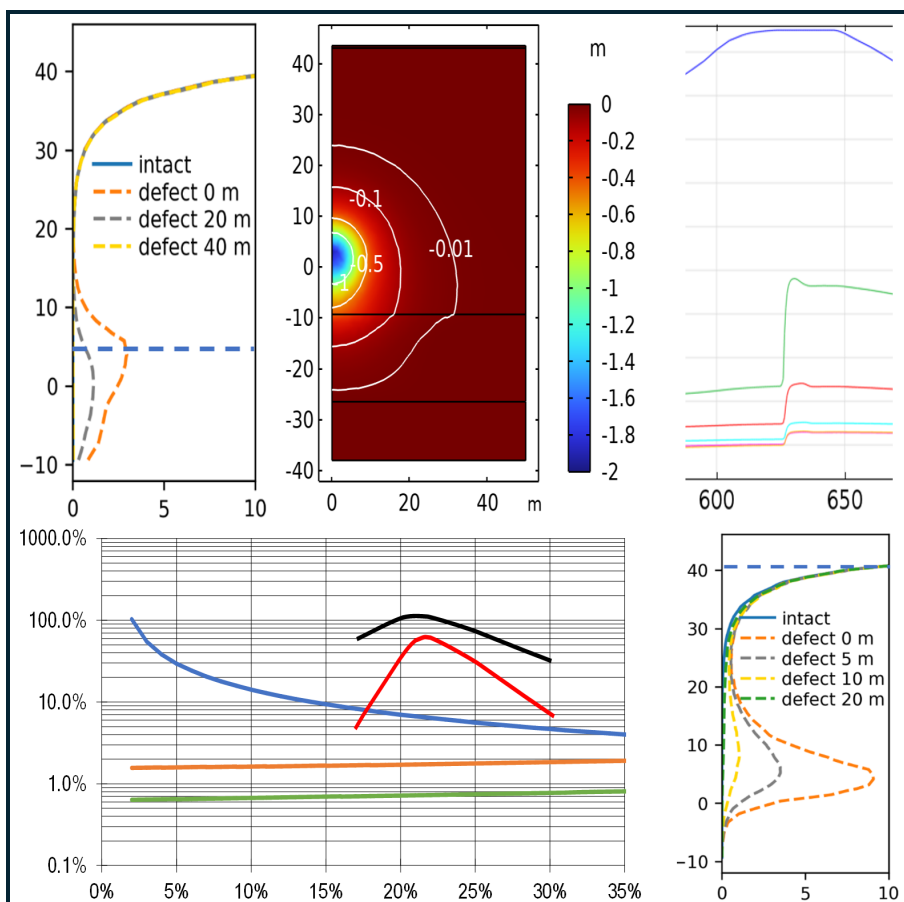


VÄGLEDNING FÖR MÄTNING OCH UTVÄRDERING AV DAMMARS FUNKTION

RAPPORT 2025:1125



DAMMSÄKERHET



Vägledning för mätning och utvärdering av dammars funktion

– En kunskapssammanställning

SAM JOHANSSON
MAGNUS LJUNGGREN
PETER VIKLANDER

ISBN 978-91-89918-26-9 | © ENERGIFORSK augusti 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Det här projektet har syftat till att sammanställa kunskap inom området dammätning och dammövervakning, med fokus på dämmande funktion hos fyllnings- och betongdammar, med internationell utblick genom publikationer från CEATI och DSIG.

Uppdraget har genomförts inom Energiforsks program för Dammsäkerhet, som fokuserar på att bidra med kunskap i det strategiska arbetet med dammsäkerhet och för att främja den svenska vattenkraftproduktionens långsiktiga utveckling.

Författare till rapporten är Sam Johansson och Peter Viklander, Hydroresearch AB samt Magnus Ljunggren, Sweco AB. Referensgruppen bestod av Kerim Genel Waldenström, Vattenfall Vattenkraft AB, Romanas Wolfsborg, Vattenfall AB, Maria Bartsch, Svenska kraftnät samt Sezar Moustafa Näsvall, Fortum Generation AB.

Rapportförfattarna ansvarar för alla resultat och slutsatser i rapporten.

Bilden på framsidan tillhandahölls av rapportförfattarna.

Sammanfattning

Dammars säkerhet är i ständigt fokus. En viktig del i att upprätthålla och förbättra dammsäkerhetsarbetet är mätning och långsiktig övervakning med instrument. Instrumentering installeras vid olika skeden och med olika syften för att följa dammars status och beteende samt för att bedöma säkerhetsmarginaler. Att övervaka felmoder och att i ett tidigt skede upptäcka förändringar i dammarnas funktion är en förutsättning för att upprätthålla en hög nivå på dammsäkerhet.

Denna rapport är en sammanställning av kunskap inom området dammätning och dammövervakning, med fokus på dämmande funktion hos fyllnings- och betongdammar.

Rapporten sammanfattar internationellt arbete av CEATI genom Dam Safety Interest Group (DSIG) och ICOLD-bulletiner samt svenska rapporter från Energiforsk. Ambitionen är att öka kunskapen om vad som behöver mätas och analyseras för att övervaka felmoder och utföra mätutvärderingar.

För att förstå och analysera mätresultat från dammar krävs kunskap om olika mättekniker. Mätningar kan utföras punktvis, som klassisk geodetisk mätning av rörelse, eller utmed en linje genom exempelvis optiska kablar för mätning av temperatur eller rörelse, eller med punktbaseade linjer som vattentryck med flera närliggande mätrör i en dammsektion. Mätningar kan även utföras på en yta genom skanning med laser eller satellit, eller av förändring i en volym med geofysiska metoder som resistivitet, georadar eller refraktionsseismik. Förståelse för vad som mäts, var det mäts och hur det mäts är centralt för tolkning av mätvärden, något som inte alltid framkommer i klassisk mätutvärdering där trender i diagram ofta tolkas.

En utvecklad mätutvärdering är en övergripande kunskapsbaserad utvärdering enligt ett övervakningsprogram (eng. Performance Monitoring Program). Detta arbetssätt samlar tillgänglig information om dammens design, uppbyggnad, drift och utförda förstärkningsåtgärder, tillsammans med resultat från mätningar och övervakning av relevanta felmoder, kända anläggningsspecifika svagheter och lokala förutsättningar.

Vid tolkning används inte bara resultat från traditionella mätningar utan även resultat och information från exempelvis magasinsnivå, ekolodning, ytskanning, geotekniska och geofysiska undersökningar, materialprovning samt övrig tillståndskontroll med visuella inspektioner. Resultatet baseras på en integrerad analys som ger en sammanvägd bild av dammens status.

Numerisk modellering/beräkning kan användas för att bättre förstå dammars beteende, som vattentryck, rörelser, vattenströmning och läckage. Detta hjälper att tolka och förstå dammars funktion och kan även användas som komplement vid utvärdering och analys av mätdata samt vid framtagning av larmgränser.

Rapporten beskriver också Datakvalitetscykeln (eng. Data Quality Cycle), en tio-stegs process för att säkerställa hög kvalitet på mätdata från

damminstrumentering. Den visar att bra mätdata är ett resultat av en korrekt utförd och dokumenterad design av instrument och att varje steg i processen kan påverka datakvaliteten. Inverkande faktorer diskuteras, från identifierat behov av mätning i Steg 1 till dataanalys och bedömning av dammsäkerheten i Steg 10.

Sammanfattningsvis framkommer tydligt vikten av att ha en helhetssyn vid övervakning av dammar. Grundläggande är en god förståelse för dammens behov, samt kompetens att kunna välja bäst metodik för att upptäcka och följa förändringar. Mätningar måste hålla hög kvalitet så att man kan lita på mätdata vid tolkning och analys. Övervakning är ett uthålligt arbete som måste prioriteras och ges tillräckliga resurser. Det är också viktigt att kompetensen inom området upprätthålls, eller snarare ökar, i och med den snabba utvecklingen av instrument, automatiska mät- och datainsamlingssystem samt datadriven övervakning.

Summary

Dam Safety is constantly in focus. An important aspect of maintaining and enhancing dam safety involves measurements and long-term monitoring using instruments. Instrumentation is installed at various stages and for different purposes to monitor the status and behavior of dams and to assess safety margins. Monitoring of potential dam failure modes and detecting changes in dam performance at an early stage are essential to maintain a high level of dam safety.

This report is a compilation of knowledge in the field of dam measurement and monitoring, focusing on embankment and concrete dams.

The report summarizes international works by CEATI through the Dam Safety Interest Group (DSIG), ICOLD bulletins, and Swedish reports from Energiforsk. The ambition is to increase knowledge about what needs to be measured and analyzed to monitor dam failure modes and perform dam monitoring data analysis.

Understanding and analyzing monitoring results from dams requires knowledge of various measurement techniques. Measurements can be done in single points, such as classic geodetic measurements of movement, along a line using optical cables to measure temperature or movement, or via point-based lines like water pressure with several nearby measuring points in a dam section. Measurements can also be performed on a surface using laser or satellite scanning, or by detecting changes in a volume using geophysical methods such as resistivity, ground penetrating radar or seismic refraction. Understanding of what is being measured, where it is measured, and how it is measured is crucial for interpreting instrument measurement data, which is not always apparent in classic monitoring data analysis where trends in diagrams are often interpreted.

Advanced monitoring data analysis is a comprehensive knowledge-based assessment according to a monitoring program (Performance Monitoring Program). This approach gathers available information about the dam's design, construction, operation, and rehabilitation measures, along with results from measurements and monitoring of relevant failure modes, known site-specific weaknesses, and local conditions.

The interpretation uses not only results from traditional monitoring points but also results and information from sources such as reservoir levels, echo sounding, surface scanning, geotechnical and geophysical investigations, material testing, and other condition assessments such as visual inspections. The results are based on an integrated analysis that provides a comprehensive picture of the dam's status.

Numerical modelling/calculations can be used to better understand dam behavior, such as water pressure, movements, water flow, and leakage. This helps interpret and understand dam behavior and can also be used as a complement in the evaluation and analysis of monitoring data and in the selection of alarm limits.

The report also describes the Data Quality Cycle, a ten-step process to ensure high-quality monitoring data from dam instrumentation. It demonstrates that good data is the result of correctly executed and documented instrument design, and that each step in the process can affect data quality. Influencing factors are discussed, from the identified need and purpose for monitoring in Step 1 to data analysis and assessment of dam safety in Step 10.

In conclusion, the importance of taking a holistic approach to monitoring dams is evident. Fundamental to this is a good understanding of the monitoring need of the dam, as well as the competence to select the best methodology to detect and monitor changes. Measurements must be of high quality so that data can be trusted for interpretation and analysis. Monitoring is a sustained effort that requires prioritization and adequate resources. It is also important that expertise in the field is maintained, or rather increased, with the rapid development of instruments, automated measurement and data collection systems and data-driven monitoring environments.

The results highlight the importance of high-quality measurements to obtain reliable data for interpretation and analysis, and that understanding and right competence must be present throughout the instrumentation process.

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	10
1.1	Allmänt	10
1.2	Syfte	11
1.3	Avgränsningar	12
1.4	Förutsättningar	13
2	Erfarenheter av dammövervakning	14
2.1	Dammätningar	14
2.2	Svenska publikationer	15
2.2.1	Beprovade metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar	16
2.2.2	Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar	17
2.2.3	Scientific workshop on internal erosion monitoring	19
2.2.4	Internal erosion detection at the Rösavatn test site	20
2.2.5	Dam safety performance monitoring and data management – best practices	21
2.2.6	Behovsanalys för rörelsemätningar för dammar	24
2.2.7	Erfarenheter av damminstrumentering	26
2.2.8	Geofysiska metoder inom dammsäkerhetsområdet. En kunskapssammanställning	26
2.2.9	Mätmetoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar	28
2.2.10	Datadrivna metoder	29
2.2.11	Testdamm i Älvkarleby	29
2.3	Dam safety performance monitoring and data management – best practice, DSIG (2024)	30
2.3.1	Bakgrund och innehåll	30
2.3.2	Felmodsmetodik	31
2.3.3	Information om dammen samt mätinstallationerna	32
2.3.4	Övrigt – Några kommentarer	33
3	Motiv till att mäta och utvärdera	35
3.1	Varför behövs övervakning?	35
3.2	Vad vill man upptäcka?	35
3.3	Felmoder	36
3.3.1	Fyllningsdammar och anslutningar	37
3.3.2	Betong- och murverksdammar	38
3.4	Mätparametrar	39
3.5	Representativitet	40
3.5.1	Mätning i enstaka punkter – 0 dimension	40
3.5.2	Mätning längs en linje – 1 dimension	41
3.5.3	Mätning av en yta – 2 dimensioner	42
3.5.4	Mätning av en volym – 3 dimensioner	43
3.5.5	Långtidsmätning - ytterligare en dimension	43

4	Vad kan mätningar ge svar på?	44
4.1	Fyllningsdammar	44
4.1.1	Plötslig läckageökning i 2D	45
4.1.2	Tryckmätning i uppströmsfilter	47
4.1.3	Plötslig läckageökning i 3D	48
4.1.4	Diskussion	51
4.2	Betongdammar och betongkonstruktioner	52
4.3	Undergrund och anslutningar	52
5	Datakvalitetscykeln	54
5.1	Behov och syfte av mätning – steg 1	56
5.2	Val av instrument - steg 2	57
5.2.1	Typer av mätningar	58
5.2.2	Visuell övervakning	61
5.3	Installation – steg 3	61
5.4	Driftsättning och fältdokumentation – steg 4	62
5.5	Dokumentation – steg 5	63
5.6	Drift och underhåll – steg 6	65
5.7	Datainsamling – steg 7	66
5.8	Databearbetning – steg 8	66
5.9	Lagring av data – steg 9	67
5.10	Analys av mätdata och dammsäkerhetsbedömning – steg 10	67
6	Slutsatser och rekommendationer	69
6.1	Slutsatser	69
6.2	Rekommendationer	70
7	Referenser	72

1 Bakgrund

1.1 ALLMÄNT

Att undvika dammhaveri står högt på agendan hos dammägare och detta särskilt för dammar med hög dammsäkerhetsklass. Övervakning av dammar, särskilt dess dämmande funktion, är därför en viktig del i kort- och långsiktigt dammsäkerhetsarbete. En tillförlitlig kunskap om vilka säkerhetsmarginaler/svagheter som finns och övervakning av dessa ger goda förutsättningar för att upprätthålla en hög nivå på dammsäkerhet. Dessutom ger det möjlighet att vid behov fortlöpande planera för säkerhetshöjande åtgärder eller beredskapsinsatser.

Tillräckligt god dammövervakning med instrumentering, som täcker utveckling av relevanta felmoder och kända svagheter i dammanläggningen, är ett allt viktigare område så väl vid förvaltning av dammar som vid byggande och genomförande av projekt. Som ett led i detta är övervakning inriktad på avbördande funktion ett växande område.

I Sverige har instrumentering av dammar fått ett ökat fokus de senaste årtiondena med en snabbt växande del av automatiserade mätningar. Tidigare utfördes i huvudsak manuella mätningar på dammar och innan digitaliseringens genombrott fanns en viss fruktan för att ta hand om stora mängder mätdata. Första versionen av RIDAS kom 1997 och under drygt tjugo år utformades, ofta okritiskt, dammars instrumenteringsbehov utifrån dess rekommendation om s.k. "basinstrumentering".

Teknikutveckling sker ständigt och moderna mätsystem har små begränsningar vad gäller att ta hand om och lagra stora datamängder. Utmaningen är nu snarare att ta hand om mätdata och följa dammens tillstånd med relevant och korrekt information. Digitaliseringen har exploderat med ett antal för- och nackdelar. Fördelarna är bland annat att det är enkelt och relativt billigt att samla in stora datamängder från tillståndskontroll och mätningar. Nackdelarna är främst risk för bristande kvalitet på mätdata och att inte drunkna i informationsmängden.

Nu gällande version av RIDAS tillämpningsvägledningar för fyllningsdammar, betongdammar och grundläggning, vägleder om att instrumentera dammanläggningar utifrån lokala förutsättningar baserat på identifierade behov genom felmodsanalys. Det finns ett antal felmoder för dammar som måste beaktas för att uppnå en god övervakning. Globala felmoder talar övergripande om hur dammar kan haverera. För fyllningsdammar är det främst de två globala felmoderna överströmning och instabilitet/degradering som kan leda till haveri.

Utlösande svagheter för överströmning kan vara en lokal svacka i dammen, för liten eller avsaknad av avbördningskapacitet, för snabb tillrinning eller fel på beräknad dimensionerande tillrinning. För instabilitet/degradering kan svagheter vara många som exempelvis felaktig design, felaktigt materialval, bristfälligt utförande som otillräcklig packning, degradering av material, inre erosion, inverkan av tjäle och upptining, bristfällig anslutning mot berg eller betongkonstruktioner, vattenströmning genom permeabla lager med åtföljande materialtransport eller sprickor i ytberg eller jord m.m. (Wolfsborg, 2025).

Internationell dammhaveri-statistik visar att de två globala felmoderna varit orsaken till en mycket stor andel av havererade fyllningsdammar.

I Sverige har ett antal dammhaverier skett av fyllningsdammar (t.ex. Noppikoski 1985, Granö 2010, Hästberga 2010), en gruvdamm Aitik 2000, (Svk, 2019) samt tillfälliga fångdammar (Näs 1977 och Satisjaure 1964). I Norge havererade en damm i Braskereidfoss 2023 på grund av överströmning, (Vannkraft Hafslund Eco, 2023).

Behovet av god dammövervakning är stort. Förmågan att ta hand om mätdata och resultat från övervakning baserad på instrumentering är central. Kunskap om dammars beteende och övervakningens förmåga att upptäcka förändringar som kan utvecklas till dammhaveri behöver ständigt utvecklas.

1.2 SYFTE

Detta projekt har utförts på uppdrag av Energiforsks Dammsäkerhetstekniskt utvecklingsprogram. Det övergripande syftet har varit att ta fram en uppdaterad kunskapssammanställning om damminstrumentering med fokus på fyllnings- och betongdammar samt deras grundläggning. Arbetet har utförts med utgångspunkt från CEATI rapporten "Dam safety performance monitoring and data management, best practices (2024 update)" (De Melo & Conkle, 2024). I uppdraget har dessutom ett urval av ytterligare referenser inom området, som t.ex. ICOLD bulletiner och Energiforskrapporter, beaktats liksom författarnas kunskap inom området.

Syftet med projektet har varit att:

- fånga andemeningen i CEATI-rapporten (De Melo & Conkle, 2024) och relevanta publikationer,
- öka förståelsen för vad som faktiskt mäts i dammar, om det görs i relevanta representativa punkter/områden, samt tolkning av resultat,
- lyfta fram relevanta typiska felmoder på en övergripande nivå för svenska fyllnings- och betongdammar och deras grundläggning,
- ge exempel på vad som kan hända i dammar genom ett antal utvalda praktikfall samt
- diskutera vad beräkningar/numerisk modellering kan bidra med för att erhålla bättre fysikalisk förståelse av dammarnas funktion och prestanda vid tolkning av resultat, vid val av instrumentering och dess placering m.m.

Målet har varit att skriva en rapport med 2024 års kunskapsnivå anpassad för svenska förhållanden. Tekniska detaljer och metodik har kortfattat tagits med, men referenser görs till litteraturen för läsning i detalj.

En fundamentalt viktig utgångspunkt för rapporten är att mäta "rätt sak" för avsett ändamål på dammen. Således är det viktigt att ha ett definierat syfte med både enskilda och samlade mätningar, samt att välja rätt utrustning.

Vidare är ambitionen att rapporten ska uppmuntra till ett tänk med en samlad tolkning av all tillgänglig relevant anläggningsinformation vid utvärdering och bedömning av dammsäkerheten. En informationsbaserad evaluering inkluderar olika typer av information, som exempelvis mätresultat från olika mätningar och tillståndskontroll (ekolodning, dykinspektion, laserskanning, geofysiska mätningar m.m.), driftförhållanden, kända svagheter, lokala förutsättningar och förändringar jämfört med när dammen togs i drift. Vid fördjupade analyser utförs vid behov kompletterande beräkning och modellering av storheter för att öka förståelse om dammens beteende och för att bedöma säkerhetsmarginaler. Det är viktigt att ett gediget ingenjörsarbete utförs vid mätutvärdering så att inte utvärderingar endast redovisas som resultat i diagram med tolkade trender under begränsad tid. Vid utvärdering behöver blicken lyftas och dammens förutsättningar samt belastningar läsas in samlat på ett ingenjörsmässigt sätt med beaktande av överlappande och historisk information. Konceptet "Performance monitoring – Performance based evaluation" har beskrivits av De Melo och Conkle (2024).

Avslutningsvis är ytterligare ett syfte med rapporten att bidra till att generellt höja nivån i branschen vid "mätutvärdering av dammar" genom aktivt "ingenjörsarbete". Detta genom att ta avstamp från dagens traditionella arbetssätt och bättre nyttja den samlade anläggningsinformationen. Nyckeln är att lägga mer kraft och tid på analysdelen i olika led av utvärdering och att använda mätning som ett verktyg för att kunna ställa diagnos till avvikelser och följa upp dammens beteende över tid, detta gärna i relation till en teoretisk bestämning/modell.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Denna rapport gör inte anspråk på att vara heltäckande för området instrumentering av dammar. För djupare beskrivningar om detaljer kring design, utförande, installation, teknisk utrustning och mätsystem samt praktiska aspekter m.m. hänvisas till litteraturen.

Följande avgränsningar har gjorts inom uppdraget:

- Mätsystem, AI, 'machine learning' och datorbaserad analys är inte inkluderad. Detta är dock ett område som författarna ser kommer att växa i framtiden.
- Hur instrumentering installeras och mätningar faktiskt utförs hanteras inte.
- Tekniska detaljer om instrumentering och funktion behandlas inte.
- Klassiska beprövade mätningar för dammar hanteras i rapporten (som läckageflöde, rörelse, porttryck och temperatur). Konventionella geofysiska metoder, olika typer av tillfällig mätning, geoteknisk sondering, provtagning etc. är inte hanterade. Inte heller ingår mätning av ytliga rörelser, vatteninnehåll i jord, geodetiska metoder, satellit, drönare eller liknande i rapporten.
- Felmoderna i rapporten gör inte anspråk på att vara heltäckande. Syftet har snarare varit att illustrera ett urval av de "viktigaste" felmoderna på

ett övergripande sätt för dammar, och diskutera hur dessa kan övervakas som goda exempel och av pedagogiska skäl. I operativt dammsäkerhetsarbete och vid analyser behöver ursprunget av felmoder förfinas till lämplig upplösning för att kunna övervakas på ett bra sätt.

- Mätning i magasin, naturliga slänter eller nedströms dammar omfattas inte i rapporten.

1.4 FÖRUTSÄTTNINGAR

För att uppnå en god dammövervakning krävs att mätningar är relevanta och korrekta samt att instrumenteringen underhålls i erforderlig omfattning, kalibreras och förnyas löpande för att ge rätt mätvärden. En fundamental förutsättning för pålitlig övervakning, och en förutsättning för tolkning och analys, är att mätdata är av hög kvalitet.

Detta projekt har sitt ursprung i en förfrågan om att utifrån en CEATI-rapport som publicerades 2024 (De Melo & Conkle, 2024), utföra en sammanställning av relevant kunskap om dammövervakning och utvärdering, för svenska förhållanden. Ett liknande arbete utfördes av Nilsson (2014) som gjorde en svensk bearbetning av en tidigare CEATI rapport inom området (Broderick & Marr, 2012).

Rapporter av ovanstående typ är ofta av stort värde för väl initierade och intresserade personer inom området. Men, läsekretsen för en sådan rapport är troligen begränsad, även om kunskapsbehovet för dammätning och övervakning generellt är stort i Sverige. För att erhålla en bättre helhetsbild och möta det aktuella kunskapsbehovet togs beslut om att utvidga det föreliggande projektet till att även fånga upp annan relevant litteratur inom dammövervakningsområdet, från bl.a. ICOLD och Energiforsk.

Många gånger består traditionella mätutvärderingar främst av redovisning av mätdata i diagram, där själva analysen av resultat inte allt för ofta saknas eller är ringa. Förhoppningen med denna rapport är att den ska kunna ge idéer och underlag för hur mätdata bättre nyttjas och tolkas kopplat till dess betydelse för dammens säkerhet.

2 Erfarenheter av dammövervakning

I detta kapitel sammanfattas ett urval av litteratur inom övervakningsområdet från 1990-talet fram till idag. Syftet med detta är främst att ge en inblick över utvecklingen av området i Sverige, men även internationellt. Därför refereras ett antal Energiforskrapporter, ICOLD bulletiner och CEATI-rapporten (De Melo & Conkle, 2024).

I Sverige har dammar byggts i flera hundra år och de tidigaste dammarna byggdes för att bättre nyttja vattnet och dess kraft mekaniskt i olika tillämpningar (som kvarn, smedja etc.), kanalbyggen, båttransport och inom gruvnäringen. Den stora vattenkraftutbyggnaden på 1900-talet medförde att större och högre dammar successivt byggdes för att magasinera mer vatten för vattenkraftproduktion. I mitten av 1900-talet började höga fyllningsdammars byggas helt av jordmaterial utan extra tätning med betong- eller träspont och behovet av instrumentering och övervakning växte fram.

Dammars och dämmande konstruktioner med olika ändamål finns runt om i samhället. De kan vara lokaliserade nära bebyggelse eller infrastruktur och kan, beroende av dammsäkerhetsklass, orsaka stora konsekvenser vid skada eller haveri. Övervakning och instrumentering av dammar är betydelsefull för dammägaren för att förstå och statusbedöma dem och bedöma säkerhetsmarginaler.

Fyllningsdammars byggs normalt med geologiska material som har stor variation i tekniska egenskaper beroende på heterogenitet och ursprung. Uppförandet av dammar påverkas av använd metodik och kvalitet vid arbeten samt materialval både vid design och byggande. Dammars påverkas av laster och viss åldring sker med tid. Medvetandet om dammsäkerhet och betydelsen av säkra dammar har ökat de senaste decennierna. Med ett genomtänkt och komplett övervakningsprogram finns förutsättningar att ha god kontroll på dammars status. Detta kan även ge en tidig varning av förändringar som kan utvecklas till dammhaveri. Med bra övervakning, rutiner för arbete med instrumentering och löpande utvärdering skapas trygghet för dammägare och samhället.

I detta kapitel sammanfattas ett urval av internationella och svenska publikationer inom dammövervakningsområdet. Detta dels för att ge en bild av områdets utveckling och dels för att sammanfatta kunskapsläget idag.

2.1 DAMMÄTNINGAR

Typiska mätningar i dammar är traditionellt (RIDAS, 2022):

- Läckageflöde.
- Rörelse och förskjutning.
- Porttryck, grundvattennivå och magasinsnivå.
- Temperatur.

Behovet och typ av mätning skiljer mellan dammtyper och dammanläggningar beroende på aktuella och relevanta felmoder och beror bland annat på typ av damm och dess uppbyggnad, grundläggningsförhållanden, anslutningar, laster, ålder, design- och byggfilosofi vid uppförandet, magasinsnivå och nedströms vattennivå, kända svagheter eller defekter.

Val och typ av mätning bestäms, förutom av behovet att fånga en felmoders initiering och förändring med tid, även av ambitionsnivå, kunskap och riskbenägenhet, projektörens syn, krav och rekommendationer i riktlinjer, bransch- och samhällsutveckling, vilja att testa ny teknik m.m. Ibland blir leverantörens val det som installeras.

Syftet med dammövervakning är olika i de olika faserna av en damms livscykel som förstudie, utredning, projektering, byggande, drift, förnyelse och rivning. Av naturliga skäl, utifrån dammsäkerhetsperspektivet, läggs störst fokus med övervakning vid byggande och drift (förvaltning). Rent statistiskt och erfarenhetsmässigt är dock den första dämningssupptagningen av magasinet av en nybyggd damm ofta kritisk.

Den utveckling som skett beträffande mätning och datahantering under de senaste decennierna är betydande. Detta har medfört en bättre förståelse för dammarnas funktion, och därmed deras tekniska status. Idag är det möjligt se data av aktuella mätresultat on-line på handhållna enheter, vilket ger helt andra möjligheter att agera jämfört med tiden då enstaka manuella mätningar redovisades i handritade diagram. Rutiner för hantering av varningsnivåer och deras överskridande kan tas fram för att upptäcka avvikelser i god tid.

I litteraturen beskrivs dammätningar t.ex. i branschrapporter, nationella riktlinjer, och konferensbidrag av ICOLD-bulletiner (1982), (1988), (1989), (1992), (2000), (2008), (2009), (2011), (2011), (2017), (2017), (2017), (2018), DSIG, ASCE (De Rubertis (Ed), 2018) och vetenskapliga tidskrifter. I Sverige har Energiforsk publicerat ett antal branschrapporter som ger god vägledning i området. För gruvbranschen kan även nämnas den standard som tagits fram av ICCM (2020), som också innefattar riktlinjer för övervakning och mätning.

I följande avsnitt presenteras ett antal utvalda publikationer som har koppling till svenska förhållande och dammar inom instrumenteringsområdet.

2.2 SVENSKA PUBLIKATIONER

Dammsäkerhetsarbetet i Sverige började ta form i modern tappning efter ett antal incidenter och dammhaverier på 1970- och 1980-talen. Detta ledde bl.a. till att första utgåvan av vattenkraftbranschens Dammsäkerhetsriktlinjer, RIDAS, gavs ut av motsvarande Energiföretagen 1997. Innan det hade Statliga Vattenfalls riktlinjer från 1950-talet och tillhörande publikationer, liksom Jord- och stenfyllningsdammar (1988) i praktiken fungerat som inofficiella riktlinjer och varit vägledande för branschen.

I takt med att dammsäkerhetsarbetet utvecklades arbetade vattenkraftindustrin med forskning och utveckling. På 1990-talet gavs en rapportserie ut av VASO dammkommitté som hade sitt ursprung från utrednings- och utvecklingsprojekt

med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer. Därefter har fram till idag Energiforsk, tidigare Elforsk, arbetat med branschens utveckling av dammsäkerhet och vattenkraft. Energiforsk bedriver idag främst forskning och utveckling kopplat till dammsäkerhet inom Dammsäkerhetsprogrammet, Betongprogrammet och Bergprogrammet. Dessutom bedrivs akademisk forskning vid ett antal högskolor och universitet inom svenskt centrum för hållbar vattenkraft (SVC) sedan 2005.

Det finns ett stort antal publikationer som har utgivits av Energiforsk som handlar om eller tangerar området dammövervakning. Det finns även publikationer i form av tidskriftsartiklar, konferensbidrag, avhandlingar och examensarbeten som helt eller delvis handlar om dammövervakning.

I det följande redovisas kortfattat ett antal utvalda svenska publikationer från 1990-talet fram till idag för att belysa utvecklingen inom området och de frågeställningar som varit på agendan över tid.

2.2.1 Beprövade metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar

Syftet med *Beprövade metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar* (Nilsson, 1995) var att översiktligt beskriva metoder för övervakning och undersökning av jorrdammar. I rapporten framgår att utvecklingen vid tiden bidragit till insikt om att dammarna behövde klara viss överdämning för att hantera högre dimensionerande flöden än tidigare praxis. Detta synsätt medförde att man generellt behövde ta reda på mer om dammens förmåga att klara belastningar som den aldrig tidigare utsatts för. Därför var intresset stort för metoder inriktade på övervakning och undersökning av dammar.

Redan då, för trettio år sedan, talades det om åldring av dammar och att man inte hade förståelse för påverkan med tiden. En annan tydlig förändring som skett då var att den dagliga bemanningen på dammanläggningar var mycket mindre än tidigare. Detta i kombination med teknikutvecklingen gjorde att fjärrstyrning av kraftverk blev vanligare liksom att automatisering och komplettering av dammars instrumentering blev aktuellt.

Fördjupad dammsäkerhetsutvärdering (FDU) var ett nytt koncept som Vattenfall hade börjat använda för sina "viktigaste" dammar. Den säkerhetsutvärdering som utfördes omfattade bl.a. "utvärdering av resultat från läckagemätningar och instrumenteringsavläsningar" och "utvärdering... om nederbörd, vattenflöde etc.". Det påtalas även att nya instrument installerades vid behov för att ytterligare bestämma om svagheter fanns.

Nilsson (1995) skriver "Instrumentering i form av läckagemätning, deformationsmätning av överytan och porttrycksmätning 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".

Den typ av basinstrumentering som avsågs för långtidsövervakning behövde anpassas för varje damm och avsåg, med referens till ICOLD för dammar högre än 15 m, följande:

- Läckagemätning.
- Deformationsmätning av överytan.
- Porttrycksmätning.

Nilson (1995) skriver vidare "*Faktorer som kan påverka omfattningen av instrumenteringen är bl.a.:*

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

Rapporten menar att mätfrekvensen för läckagemätning är beroende av läckagets storlek och kan variera från ett par observationer per år om det är mycket litet till kontinuerlig mätning. Deformationsmätningar utfördes vanligen en gång per år.

Kompletterande instrumentering var särskilt tänkt för dammar i "högsta riskklassen" och exempel som nämns är automatiserad läckagemätning och automatiserad deformationsmätning (inklinometer).

Undersökningsmetoder som användes för dammar var sondering (viktsondering och lätt slagsondering, spetskraftsondering och hejarsondering), provtagning, borring och provgropar.

2.2.2 Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar

I rapporten *Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar*, (Johansson, o.a., 1995) redovisas olika metoder i syfte att finna "nya" mätmetoder som kan vara lämpliga för mätning på fyllningsdammar då och i framtiden. "Nya" metoder avsåg sådana som vid tidpunkten inte använts i någon större omfattning på dammar, men inom angränsande tillämpningar. De beprövade metoderna var läckageflöde, rörelser och porttryck.

De föreslagna metoderna utvärderades utifrån en modell som baserades på ett antal skadetyper som kan uppkomma i dammar. Av den framgick att hur inre erosion utvecklas är av avgörande betydelse för flertalet skadetyper uppkomst och omfattning. Man redovisar att strömningsrelaterade (flödesberoende) mätparametrar ger större mätbara förändringar relativt sett än materialrelaterade mätparametrar varför de förra är att föredra för att detektera förändringar i dammar orsakade av inre erosion.

Rapporten talar om att mätningar i dammar principiellt utförs med två olika syften: 1) övervakning och 2) undersökning, och att det finns nya mätmetoder som kan utgöra ett bra komplement till befintliga metoder. Man framför att den erfarenhet som insamlats med beprövade metoder är värdefull och att dessa mätningar behöver fortgå trots att "nya" metoder introduceras.

När en avvikelse lokaliserats kan metoder som borrhålsradar och Sonic-cross-hole eller temperaturmätning användas för att inhämta ytterligare information med högre upplösning.

(Johansson, o.a., 1995) skriver "De vanligaste metoderna för övervakning är mätningar av vattenläckage, sättningar och vattenstånd. Då en förändring konstaterats sker ytterligare undersökningar, t.ex. genom sondering eller borrhning med provtagning. Dessa metoder har använts sedan lång tid och en betydande tolkningserfarenhet har byggts upp. Flertalet av de normalt förekommande metoderna ger punktviss information, var det med dessa metoder kan vara svårt att få en helhetsbild av förändringar av dammens funktion."

I rapporten talas om incidentundersökningar. Sådana har sitt ursprung i att en förändring uppkommit som menligt skulle kunna påverka dammens funktion. Två förenklade exempel illustreras på hur incidentundersökningar kan utföras:

1. En betydande läckageökning har uppmätts. Ursprunget för läckagets läge i dammen är okänt.
2. En synlig skada har uppkommit i dammen som t.ex. ett sjunkhål. Undersökningar kan då fokuseras till ett bestämt (begränsat) parti av dammen.

En tabell med en sammanställning med över 15 olika skadetyper och 14 tillhörande mätparametrar som påverkas vid en förändring i dammkroppen listas. Mätparametrarna är rörelse, porttryck, flöde, vattenkvalitet, temperatur, spänning, sprickvidd, densitet, porositet, hydraulisk konduktivitet, korngradering, ljud och magasin nivå.

Mätmetoder som presenteras, och som inte klassats som beprövade, är:

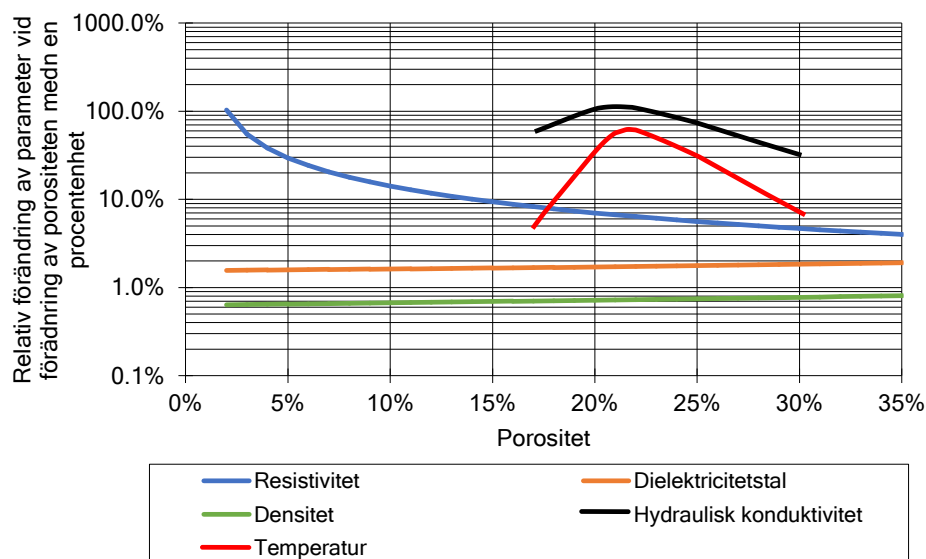
- geofysiska metoder (akustiska metoder, elektriska metoder, elektromagnetiska metoder),
- radioaktiva metoder,
- analys av läckagevatten (hydrokemisk analys, grumlighet och spårämnesförsök),
- temperaturmätningar.

Vad gäller uppdaterad information om geofysiska metoder idag hänvisas till (Sjödahl, Johansson, & Dahlin, 2019)

En utvärderingsmodell presenteras i vilken olika metoders lämplighet för att upptäcka inre erosion kan jämföras. Inre erosion kännetecknas av att finmaterial transporterats bort från tätjorden. Detta medför med tiden en ökad porositet och hydraulisk konduktivitet samt ökat flöde. Samtidigt minskar densiteten och vattenkvoten ökar, vilket förändrar elektriska och elektromagnetiska egenskaper, samt ljudhastigheten i materialet. Det ökade flödet medför större temperaturvariationer och ökad självpotential. Detta betyder att inre erosion ger upphov till förändringar i materialegenskaper och strömningsegenskaper.

Av speciellt intresse för svenska fyllningsdammar är att jämföra olika metoders möjlighet att upptäcka tecken på inre erosion. Studierna har visat att de flödes-

relaterade parametrarna (hydraulisk konduktivitet och temperatur) generellt ger ett betydligt större utslag än de parametrar som är beroende av förändringar i materialet beroende på ändrade proportioner mellan vatten och fast material (resistivitet, dielektricitetstal och densitet). Detta visas principiellt i Figur 2-1, som baseras på teoretiska samband och laboratorieförsök på jordprov.



Figur 2-1 Olika mätparametrars relativa förändring vid förändring av porositeten med en procentenhet. Modifierad från (Johansson, o.a., 1995).

För övervakning bedömdes självpotential (SP), resistivitmätning och temperaturmätning vara lämpligast för komplettering av befintliga metoder. Alla dessa metoder är känsliga för läckageförändringar. Även turbiditetsmätning, hydrokemisk analys av läckagevatten, samt i framtiden läckljudsmätning bedömdes kunna användas för övervakning.

Vid incidentundersökning kan SP-mätning vara den lämpligaste metoden för att lokalisera en förändring. Även resistivitmätning och georadar är lämpliga metoder då de kan utföras direkt på dammen utan ingrepp. Reflektionsseismik bedömdes på sikt kunna användas för ändamålet.

2.2.3 Scientific workshop on internal erosion monitoring

En workshop (Scientific Workshop on Internal Erosion Monitoring) genomfördes i Stockholm 13–15 juni 2001 och arrangerades av Elforsk (Bergman & Johansson, 2000). Denna bestod av ett antal presentationer och efterföljande diskussioner för att öka förståelsen kring möjligheter att på olika sätt detektera inre erosion i fyllningsdammars. Ett studiebesök anordnades till Sädva efter workshopen.

Ett av syftena med workshopen var att diskutera icke förstörande metoder och särskilt tolkning av resultat och resultatens stora spännvidd för att skapa ett forum för utbyte av erfarenheter bland forskare och dammägare. Andra syften var:

- Att skapa ett vetenskapligt forum för diskussion och utbyta erfarenheter om olika metoders grundprinciper, utvecklingspotential och förbättringar för att upptäcka inre erosion i fyllningsdammar.
- Att etablera en kontaktyta mellan forskare och dammägare för att utbyta erfarenheter och diskutera pågående projekt i utbyte mellan Europa och Nordamerika (genom DSIG – Dam Safety Interest Group).

Workshopen behandlade dammätning i stort och de olika geofysiska metoderna temperatur, resistivitet, strömningspotential, akustiska samt elektromagnetiska metoder. I ett inledningsanförande gav E. Di Biagio, NGI en presentation om instrumentering av dammar. Han nämnde att det finns ett antal problem involverade vid mätning och att man måste veta vad som ska mätas och att göra detta med lämplig utrustning. Han avslutade med att ge några trender inom instrumenteringsområdet:

- Mer automatisering.
- Nya kommunikationsmetoder.
- Förbättrad GPS mätning.
- Ökad användning av optofibermätning och sensorer.
- Ökad användning av geofysiska mätningar.
- Förbättrad/standardiserade mätdatahantering och analys samt presentationsverktyg.

Efter ett antal teknikorienterade presentationer om möjligheter och metoder fördes diskussioner som är dokumenterade i rapporten.

Med facit i hand nästan 25 år senare kan man konstatera att det mesta av det som förutsågs vid workshopen har slagit in.

2.2.4 Internal erosion detection at the Rösavatn test site

I samband med de dammhaveriförsök som utfördes i Rösavatn genomfördes också en test av olika geofysiska metoder för att upptäcka inbyggda svagheter i dammen. Detta finns redovisat av (Johansson & Nilsson, 2005) och består av tre delprojekt:

- Del A "Assessment report", Johansson, S. och Nilsson, Å.
- Del B "Design and construction of the dam and the defects", Nilsson, Å. och Garner, S.
- Del C "Pre-study and field measurements using resistivity, self potential, and temperature", Dahlin, T., Friborg, J., Johansson, S. och Sjö Dahl, P.

I ett samarbetsprojekt mellan BC Hydro, Elforsk och EBL byggdes en testdamm i Rösavatn, Norge i juli 2003. Dammen hade höjden 5,25 m och längden 37 m och hade en tät kärna av finkornig morän och stödfyllning av sprängsten. Tre skador vardera med tvärsnittet 0,16 m² byggdes in i tät kärnan genom olika geometriska formationer som fylldes med grus. Vid försöken visade det sig att en fjärde skada

utvecklades vid dränering under dammen som hade lika stor hydraulisk kapacitet som de tre designade skadorna. Syftet var att genom blindförsök klarlägga om man med de tre konventionella geofysiska metoderna resistivitet, självpotential (SP) och temperatur kunde identifiera skadornas lokalisering. Vid försöket utfördes även visuell inspektion av dammen.

Projektet bestod av en "mätgrupp" bestående av utförare av de geofysiska metoderna samt en grupp som "designade skadorna". Mätgruppen utförde också inledande beräkningar av vilka detektionsgränser som var rimliga för de olika metoderna. En förstudie genomfördes då mätgruppen utförde numerisk modellering för att bestämma de geofysiska metodernas förutsättningar och möjlighet att identifiera skadorna.

Resultaten från det norska försöket visade att temperaturmätning och visuella inspektioner kunde fånga in de fyra skadorna från nedströms dammtå. Dessa metoder kan emellertid inte svara på var skadan i tät kärnan är. Resistivitet fångade tre skador med en viss spridning och självpotential gav sämst resultat då ingen skada kunde identifieras med metoden. Dessa elektriska metoder kan dock användas för att lokalisera skador i tät kärnan under vissa förhållanden.

Författarna menar att geofysiska metoder ska användas för en gemensam utvärdering då de har sina för- och nackdelar snarare än att utföra enskilda utvärderingar. De pekar även på att samtliga använda mätmetoder fungerar bättre vid långvariga eller upprepade mätningar än vid enstaka korttidsmätningar.

Avslutningsvis ges några rekommendationer om fortsatta utvärderingar:

- Det är viktigt att förstå resultaten från testdammen; både vad som var bra och inte.
- Att använda resultat och erfarenheter från testdammen i andra skalor d.v.s. för fullstora dammar.
- Att repetera försöken eller utföra andra försök i olika skala på ett systematiskt sätt för att öka kunskapen inom området.

2.2.5 Dam safety performance monitoring and data management – best practices

Nilsson (2014) återger en svensk kortversion av CEATI-rapporten Dam Safety Performance Monitoring and Data Management – Best Practices (Broderick & Marr, 2012) kompletterat med egna reflektioner. De delar som tagits med är sådana som författaren bedömt vara aktuella för svenska befintliga dammar.

I rapporten lyfts särskilt fram arbetssättet för att upprätta program för tillståndskontroll med fokus på övervakning och hantering av mätdata och att den är skriven med målet att visa behovet av underlag och hur man lämpligen upprättar programmet. Författaren noterar att CEATI-rapporten *"fokuserar mycket mer än RIDAS på att använda felmodsanalyser som underlag för att utveckla programmet för tillståndskontrollen."*

En förklaring av termen övervakning görs. Syftet med övervakning är att upptäcka och observera förändringar beträffande dammanläggningens tillstånd. Hela dammättningsprocessen ingår i övervakningen som i sig kan vara manuell eller automatisk. Den automatiska övervakningen tillsammans med manuell avläsning och registrering av data har samlingsbegreppet dammätning. I begreppet inkluderas även kvalitetssäkring och analys av mätdata. Termen instrumentering syftar enligt författaren på *"mätanordning som exempelvis mätöverfall, porttrycksmätare, temperaturmätare etc."*.

Ett systematiskt arbetssätt för framtagande av ett program för tillstånd beskrivs i tio steg:

1. Samla in och utvärdera information om dammen.
2. Identifiera tänkbara förlopp för dammhaveri.
3. Identifiera mätningar som kan och bör genomföras.
4. Projektera lämpligt system.
5. Planera installation, kalibrering, underhåll, datainsamling och -hantering.
6. Upphandla, installera, testa och ta systemet i drift.
7. Underhålla och kalibrera instrumenten.
8. Samla in bearbeta och utvärdera data.
9. Tolka och rapportera resultat.
10. Vidta förbättringsåtgärder vid behov.

Instrument är placerade eller ska installeras för att samla in information för att kunna svara på specifika frågor om dammens funktion, dess grundläggning och hur anslutningar fungerar. Som underlag för projektering av instrumentering används inhämtad kunskap vid projektering och byggande av dammen där särskilda behov av övervakning kan ha identifierats.

Författaren noterar att *"En analys av tänkbara dammbrottsförlopp är ett effektivt sätt att bestämma vilka frågor, som återstår att besvara efter det att dammens funktion studerats under byggnadstiden, första uppfyllning av magasinet och dess funktion under drifttiden"*.

Författaren skriver att acceptabla och förväntade mätvärden behöver bestämmas för varje instrument för förväntade laster och att avvikelser uppmärksammas genom:

- Varselvärde: indikerar mätvärde som avviker något från förväntat värde.
- Larmvärde: anger maximalt/minimalt accepterat mätvärde. Vid den nivån behöver åtgärder vidtas.

Tänkbara dammhaveriförlopp (felmoder) övervakas med instrumentering och följande frågeställningar behöver besvaras för varje förlopp:

- I vilket skede kan vi genom observationer eller mätningar upptäcka var ett eventuellt brottförlopp befinner sig?

- Kan det tänkbara dammhaveriförloppet upptäckas genom instrumentering?
- Hur snabbt kommer det tänkbara dammhaveriförloppet att utvecklas?
- Vilket mätinstrument, om något finns, är lämpligt för att upptäcka det tänkbara dammhaveriförloppet tillräckligt tidigt?
- Hur ofta behöver data från instrumenteringen samlas in och utvärderas?
- Hur kommer data från instrumenteringen att samlas in och utvärderas?
- Hur är ansvaret fördelat för att mätning genomförs, samlas in och utvärderas samt hur är personalen utbildad?

Författaren skriver *"Instrumentering och mätningar behöver vara noggrant planerade och utförda för att uppnå ett definierat mål. Varje instrument behöver ha ett specifikt syfte, som oftast kan vara att upptäcka dammbrottsförlopp i ett tidigt skede, men som också kan vara att kontrollera effekten av en åtgärd eller att öka förståelsen för dammens funktion. Om mätinstrumentet inte har ett specifikt syfte bör det inte installeras.*

Installation av mätinstrument eller insamling av data medför i sig ingen förbättring av dammsäkerheten, även om instrumenten är noggrant utvalda, placerade och installerade. De mätvärden som instrumenteringen ger, behöver målmedvetet bli insamlade och regelbundet utvärderade genom omsorgsfull reducering, tabellering och/eller uppritning.

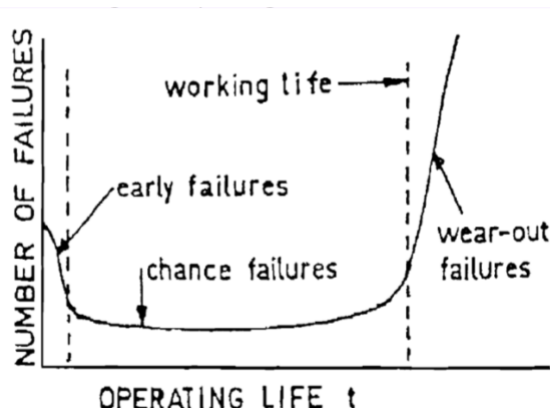
Ett heltäckande dammsäkerhetsprogram behöver ett detaljerat övervakningsprogram, som innehåller procedurer som medför att data erhålls och är kvalitetssäkrade. Informationen behöver utvärderas i rätt tid och avvikelser blir noggrant undersökta samt att åtgärder blir vidtagna i de fall informationen tyder på att dammen uppträder på ett oacceptabelt sätt."

Statistik redovisas även från inträffade dammhaverier i USA som uppkom vid en lägre belastning än dimensionerande flöde. Ett större antal dammhaverier uppkommer vid en lägre belastning i kombination med komplexa kombinationer av andra omständigheter (tekniska fel och brister, mänskliga fel, drivgods som blockerar utskov m.m.).

Med koppling till behov av instrumentering och övervakning visar även författaren att en analys av mer än 1100 dammhaverier och incidenter från ICOLD pekar på att:

- en tredjedel av händelserna inträffade under byggtiden och inom fem års drift,
- 50 % av händelserna inträffade inom tio år från idrifttagning.

Antalet dammhaverier har konstaterats öka då dammars ålder är mer än 50–60 år. Ökningen är dock inte så snabb som de principiellt visas i Figur 2-2.



Figur 2-2 Antal dammhaverier principiellt i olika skeenden: första dämning, drifttiden och för en åldrad damm efter Nilsson (2014).

Författaren lämnar ett antal reflektioner och förutser följande utveckling inom dammövervakningsområdet:

- Mer fokus på riskanalytiskt tänkande och dammsäkerhetsprogram.
- Mer integrering av inspektioner och resultat från instrumentering.
- Mer fokus på dammhaveriflöpp för att ge omfattning och typ av instrument och dess placeringar.
- Situationsanalyser som underlag för instrumenteringsprogram.
- Analys och presentation med anpassade analysstöd för dammar.
- Varselvärden och larmvärden definieras för alla mätningar.
- Fler utvärderingar, prioriteringar och anläggningsspecifika anpassningar till varje enskild damm.
- Mer utbildning av alla personalkategorier i organisationen inom tillhörande teknikområden, de som upprättar program för tillståndskontroll och utför mätutvärderingar.

2.2.6 Behovsanalys för rörelsemätningar för dammar

I rapporten "*Behovsanalys för rörelsemätningar för dammar*" (Ekström & Lier, 2013) görs en genomgång av konventionella och nya metoder för rörelseövervakning av fyllningsdamm. Traditionell rörelsemätning (sättning och förskjutning) utförs normalt som långtidsmätning med geodetisk mätning av dubbar installerade i dammen med totalstation eller avvägning. På senare tid har laserskanning med större yttäckning blivit vanligare.

När särskilt övervakningsbehov finns av att mäta rörelser i dammar mer detaljerat används, enligt författarna, "...*extensometer, inklinometer, tryckceller, optisk fiber eller pendel*". Sådana mätningar har hög precision men mäter i de flesta fallen endast i en punkt.

Man beskriver en teknikutveckling, och att det med en kommersialisering och möjlighet att använda satellitdata gjort användning av InSAR möjlig för

långtidsövervakning, av rörelser av dammar. Detta genom att man över tid får en yttäckande bild över globala rörelser över ett större område än med konventionella mätningar.

Författarna presenterar en lista med tillgängliga metoder för rörelsemätning. Dessa är:

- Punktvis mätning (totalstation och avvägning).
- Laser.
- Optisk fiber.
- InSAR
- Markbaserad radaranalys med SAR.
- Globalt satellitbaserat navigationssystem.
- Extensometer.
- Inklinometer.
- Hydrauliska system och tryckceller.

InSAR teknik beskrivs detaljerat i rapporten och bygger på en metodik som nyttjar satellitbilder och fasförskjutning mellan dem för att analysera rörelser över stora arealer. Ytterligare information finns även redovisad i (Lier, Getinic, Ekström, Lauknes, & Y., 2015) Mätnoggrannheten är på $\pm$ någon mm i höjdled och har en hög upplösning i plan. Några fördelar med metoden, jämfört med konventionella geodetiska mätningar i enstaka punkter, är:

- Förändring i nivå och läge för en specifik punkt kan fås utan manuell mätning på plats.
- Tillgång finns till arkiverade historiska mätdata.
- Möjlighet att verifiera tidigare mätdata från andra mätmetoder och kalibrera befintliga data.
- Möjlighet att studera ett större område (magasin, hela dammar m.m.).

Begränsningar med metoden är:

- Osäkerheter i detektering av retursignalen.
- Felaktiga resultat kan fås p.g.a. hög terräng, snötäcke och vegetation. Dessutom påverkar satellitens bana mätningarnas orientering och därigenom dess noggrannhet. Delar av dammen kan även hamna i skugga.
- Förhållandevis långa återkomsttider för satellitens passage.

Ytterligare en begränsning är att det endast är ytan som övervakas med InSAR. Med andra metoder som t.ex. inklinometer och mätdubb erhålls information om rörelser i dammkroppen.

2.2.7 Erfarenheter av damminstrumentering

Ett Energiforskningsprojekt med titeln "*Erfarenheter av damminstrumentering*" utfördes av Mohlin och Åström (2019). Syftet var att kartlägga ett antal brister samt att ge förslag på åtgärder i syfte att förbättra kvaliteten på damminstrumentering i hela "instrumenteringskedjan". Detta innefattar projektering med framtagande av förfrågningsunderlag och borrprogram, inköp och upphandling, utförande, projektavslut, drift och underhåll med huvudfokus på att belysa problem som orsakas av främst kompetensbrist.

I rapporten redovisar författarna ett antal brister vad avser hela kedjan med instrumentering från projektering till projektavslut/dokumentation och förvaltning. Dessa brister är:

- Bristande kunskap hos projektör, beställare och entreprenör.
- Brister i funktionstest av instrument.
- Bristande drift och underhåll.

Författarna rekommenderar att en utbildning tas fram för samtliga nyckelaktörer i branschen och att ett certifieringssystem introduceras för att höja kompetensnivån vid instrumenteringsarbeten. De identifierade brister i damminstrumenteringsprojekt sammanfattas med rubrikerna:

- Projektering samt upprättande av förfrågningsunderlag och borrprogram.
- Inköp och upphandling.
- Utförande och skillnader på fyllningsdammar och betongdammar.
- Projektavslut.

Man poängterar värdet av att förfrågningsunderlaget är granskat/kvalitetssäkrat utifrån ett instrumenteringsperspektiv. Dessutom tycker man att tekniskt sakkunnig inom ägarorganisationen bör ges större inflytande i projekt för att uppnå ett bättre slutresultat.

2.2.8 Geofysiska metoder inom dammsäkerhetsområdet. En kunskapssammanställning

Syftet med rapporten "Geofysiska metoder inom dammsäkerhetsområdet" (Sjödahl, Johansson, & Dahlin, 2019) var huvudsakligen att utgöra en kunskapssammanställning och ge en nulägesbeskrivning för att följa upp den tekniska utvecklingen de senaste tjugo åren inom området geofysiska metoder med tillämpning inom dammsäkerhetsområdet och särskilt för fyllningsdammar.

Inre erosion är en vanlig felmod i svenska fyllningsdammar som förändrar porositet och vattenmättnad i jorden som leder till ökat läckageflöde. Tidigare studier har visat att parametrar som är relaterade till läckageflöde eller förändringar i läckageflöde är bättre indikatorer än parametrar som är relaterade till materialegenskaper och materialförändringar.

Författarna redovisar en genomgång av geofysiska mätmetoder med kortfattad beskrivning av metodik och möjlighet och begränsningar. De metoder som diskuteras i rapporten har grupperats i åtta olika huvudområden, se Tabell 2-1.

Tabell 2-1 Geofysiska metoder efter Sjödahl o.a. (2019)

	Typ av metod	Förklaring
1	Temperatur*	
2	Elektriska metoder	Självpotential* (SP), Resistivitet* (ERT), Inducerad Polarisation* (IP)
3	Akustiska metoder	Refraktionsseismik*, Reflektionsseismik, Ytvågsseismik*, Ekolod/Sonar, Läckljudsmätning, Övriga seismiska metoder
4	Georadar*	
5	Induktiva elektro-magnetiska metoder	Very low frequency (VLF), Radio magneto-tellurik (RMT), Slingram, Transient elektromagnetisk sondering (TEM), Magnetisk resonanssondering (MRS), Elektromagnetisk profilering
6	Magnetiska metoder	
7	Gravimetriska metoder	
8	Övriga metoder	Geofysisk borrhålsloggning, Analys av läckagevatten och turbiditet

* Dessa metoder beskrivs mer i bilagor till rapporten.

Av de metoder som tagits med i rapporten är enligt författarna temperaturmätning den absolut mest använda på dammar, vilket tillskrivs att den har goda förutsättningar och har använts frekvent i många år, samt haft en positiv teknisk utveckling med distribuerad mätning med optisk fiber.

Elektriska metoder används vid några dammar i Sverige. Även dessa metoder (resistivitet och inducerad polarisation) bedömdes ha potential att utvecklas vidare och anpassas för dammar. Inducerad polarisation, som då var en tämligen oprövad metod bedömdes ha en särskild utvecklingspotential.

Akustiska metoder med refraktionsseismik och ytvågsseismik har utvecklats snabbt och har potential för att användas i dammar även om mer utvecklingsarbete behövs. Gravimetriska metoder och magnetiska metoder bedöms ha begränsad användbarhet.

Integrerad modellering/inversion av flera sammanlänkade parametrar simultant, t.ex. flöde, temperatur, resistivitet, IP och SP, skulle kunna öka förståelsen för de interna processerna i en fyllningsdamm. Även 4D invers numerisk modellering med analys av förändring i tid utifrån 3D modeller skulle kunna vara en möjlig vidareutveckling.

Direkta metoder som kan detektera tecken på inre erosion och förändringar är av särskilt stort intresse. Ett antal direkta parametrar är läckageflöde, porositet och finjordshalt. De flesta geofysiska metoder mäter andra parametrar (indirekta), vilka i sin tur har koppling till de direkta metoderna. Generellt rekommenderades att fokusera på flödesberoende parametrar, dvs. de metoder vars mätparametrar har direkt koppling till läckageflödet. Övriga metoder kan också fungera, men då med högre ställda krav på mätnoggrannhet etc.

Författarna lämnar avslutningsvis ett antal rekommendationer på fortsatta studier eller för att öka kunskapen om geofysiska metoder, dessa är:

- Fokusera på metoder med mätparametrar som har direkt koppling till vattenströmning. Övriga metoder (materialberoende) kan fungera men kräver då en högre mätnoggrannhet.
- Gör en utbildningssatsning på geofysik för dammbranschen.
- Erfarenhetsåterföring vid användande av geofysiska metoder både med lyckade och mindre lyckade erfarenheter.

2.2.9 Mätmetoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar

En sammanställning av metoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar redovisades av Reschetiuk o.a. (2022) med titeln. "Mätmetoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar". I rapporten beskrivs tekniker och metoder för rörelseövervakning av svenska fyllningsdammar, både ytligt och i dammkroppen. Även en internationell utblick görs för att få en mer komplett bild av tillgängliga metoder för rörelsemätning. En avgränsning med genomgången är att rörelsemätning under vatten inte behandlas, men där kan ekolodning användas.

Författarna påpekar att *"ingen av de metoder som beskrivs i denna rapport kan ensam ge en heltäckande bild av de rörelser"* som sker i en fyllningsdamm. Man framför att det bästa ur övervakningssynpunkt istället är att kombinera flera tillgängliga metoder beroende på övervakningens syfte.

De beskrivna metoderna för rörelseövervakning av fyllningsdammar har delats in i tre undergrupperingar enligt:

- Punktbaserade metoder: Avvägning, Totalstation, Global Navigation Satellite System (GNSS) samt automatiserad övervakning med integrerade system.
- Ytbaserade metoder: Markbaserad (Terreser) laserskanning, Unmanned Aircraft System (UAS) – fotogrammetri och laserskanning, Satellitbaserad (Interferometric) Synthetic Aperture Radar (InSAR), samt Markbaserad Synthetic Aperture Radar (Markbaserad SAR).
- Mätning i dammkroppen: Inklinometer, Extensometer, Sättningsmätare, Optisk fiber (töjning), samt Shape Accelerometer Array (SAA).

I rapporten beskrivs utförandet av metoderna principiellt och för- och nackdelar ges. I en tabell sammanställs och värderas/exemplifieras ett antal parametrar för

rörelseövervakning beskrivna i grupperingarna ovan. Det som beskrivs i tabellen för varje metod är mätnoggrannhet, typ av rörelse, tidsåtgång för mätning, möjlighet till realtidsövervakning, livslängd och användningsområde på svenska dammar.

2.2.10 Datadrivna metoder

Inom Energiforsks Dammsäkerhetstekniskt utvecklingsprogram har fyra rapporter publicerats inom området "datadrivna metoder" mellan 2020-2024 med Svenska Miljöinstitutet IVL som utförare. Fokus med projekten har varit att allmänt öka kunskapen inom området. Arbetet har fokuserat på detektion och identifiering av givar- och kommunikationsfel med tillämpning av multivariata metoder för att fånga avvikande tillstånd för dammar och att visualisera detta.

De fyra rapporterna är:

1. *Datadrivna metoder för att detektera avvikande mätvärden inom dammsäkerhet*, (Johansson, Fridén, Samuelsson, & Björk, 2020)
2. *Detektion av givar- och kommunikationsfel* (Jacobson, Johansson, Fridén, & Björk, 2021)
3. *Metoder för datadriven dammövervakning* (Jacobson, Fridén, & Björk, 2022)
4. *Uni- och multivariata metoder för upptäckt av avvikelser i dammar*, (Fridén, Jacobson, & Björk, 2024)

2.2.11 Testdamm i Älvkarleby

Under 2019–2024 utfördes ett FoU-projekt av Vattenfall vid Älvkarlebylaboratoriet med det primära syftet att undersöka om inbyggda skador i en fyllningsdamm kan identifieras med konventionella geofysiska metoder i ett blindtest. Ett annat syfte var att generellt lära mer om fyllningsdammars beteende och specifikt inre erosion i en damm byggd med typiska svenska förhållanden med en tät kärna av finkornig morän och filter av grusig sandig typ. Viklander o.a. (2023) beskriver projektet mer ingående.

En 4 m hög stenfyllningsdamm utformades enligt (RIDAS, 2011) med tät kärna av finkornig morän, två filterlager av grusigt sandigt material och stödfyllning av sprängsten i syfte att vara långtids stabil. Dammen byggdes i ett betongtråg och hade en 3,5 m hög tät kärna och var 20 m bred. Den utrustades med traditionell instrumentering som läckagemätning med mätöverfall, grundvattenrör och rörelsemätning med laserskanning av ytan samt omfattande geofysisk utrusning och fiberoptiska kablar i filtren för mätning av temperatur och töjning. I dammen byggdes det in sex olika väldefinierade skador, se Viklander o.a. (2023) för detaljbeskrivning, som bestod av grovfiltermaterial i tät kärnan utformade som horisontella lager i olika geometrier och en vertikal cylinder, men konstruerade för att möjliggöra drift under lång tid. Dessutom byggdes två kuber, av trä respektive betong, in i tät kärnan för att simulera stora block.

En del av dammen byggdes helt utan skador och instrumenterades med ett geotekniskt fokus med porttrycksmätare, töjningsmätning och SAA-inklinometer för att studera bland annat vattenmättnadsgrad och porttrycksutveckling med tid efter magasinet fyllts med vatten (Toromanovic, 2024).

Resultat från projektet har presenterats i ett stort antal Energiforskrapporter exempelvis (Bernstone, Lagerlund, Toromanovic, & Juhlin, 2021) och artiklar och en workshop om testdammsprojektet hölls vid ICOLD 2023 i Göteborg.

Sammanfattningsvis visar resultaten från blindtestet att temperaturmätning med fiberoptik och resistivitetsmätning var de geofysiska metoder som absolut bäst identifierade de inbyggda skadorna med god precision. Övriga geofysiska metoder kunde inte detektera skadorna. I samband med rivning av dammen upptäcktes omfattande skador i tåtkärnan orsakade av inre erosion som i de flesta fallen inte hade någon koppling till de sex byggda skadorna. Lagerlund (2025) redovisar dokumentation av rivning av dammen efter fyra års drift.

2.3 DAM SAFETY PERFORMANCE MONITORING AND DATA MANAGEMENT – BEST PRACTICE, DSIG (2024)

2.3.1 Bakgrund och innehåll

De Melo och Conkle (2024) har på uppdrag och finansiering av CEATI's Dam Safety Interest Group (DSIG), i vilken Energiforsk medverkar, författat rapporten "Dam Safety Performance Monitoring and Data Management – Best practice (2024 update)". Rapporten är en kunskapssammanställning på ca 400 sidor (varav 250 utgörs av bilagor), innehållande en omfattande genomgång av checklistor vid installation och inspektion, beskrivning av mätmetoder, utrustning, exempel på skador, felmodsmetodik, med mera. Delar av kunskapssammanställningen diskuteras i följande avsnitt, tillsammans med kommentarer som är relevanta vid tillämpning i Sverige.

Rapporten är en uppdatering av en tidigare rapport från 2012 och fokuserar särskilt på tre områden:

1. Visuellt övervakning och dokumentation som en del av övervakningsprocessen.
2. Användning av informationsbaserad data vid utvärdering.
3. Utveckling av ny teknologi för datainsamling och operativ drift.

I rapporten introduceras begreppet "Dam Safety Performance Monitoring Program" som används för att fånga alla aspekter avseende dammövervakning, vilka kan användas för att förstå och tolka dammars beteende. Detta ger därför en mer djuplodande och komplett utvärdering än vad som traditionellt utförs. Ett informationsbaserat angreppssätt, som inte bara beaktar och tolkar enskilda typer av mätningar och tillhörande mätvärden isolerat, utan som integrerar all tillgänglig information som är relevant för tolkning av dammen och som kan påverka bedömningen av exempelvis en felmods utveckling med tiden. I den breddade och fördjupade analysen inkluderas exempelvis information från visuella observationer, förändrade förhållanden, teknisk kunskap om dammar,

kompetens hos personal m.m. tillsammans med resultat från mätningar vid tolkning.

För att ta fram ett komplett "Dam Safety Monitoring Program" behöver, enligt författarna, följande beaktas:

- Teknisk information för att förstå dammens funktion.
- PFMA (potential failure mode analysis).
- En plan som beskriver visuell inspektion och instrumentering.

2.3.2 Felmodsmetodik

För att upprätta ett effektivt "Dam Safety Performance Monitoring Program" behövs goda kunskaper om de PFM (potentiella felmoder) som faktiskt kan uppkomma specifikt för dammen eller dess grundläggning. Utvecklingsförloppet för en PFM delas in i de fyra stegen:

- 1) Initiering (initiation),
- 2) Tidig utveckling (continuation),
- 3) Fortsatt utveckling (progression) och
- 4) Okontrollerad utströmning från magasinet/dammhaveri (uncontrolled reservoir release).

Målet är att identifiera utveckling av felmoden i ett så tidigt skede som möjligt. Detta eftersom man då dels har mer tid att agera och bestämma nödvändiga åtgärder, dels är eventuella åtgärder och förstärkningar troligtvis enklare och billigare att utföra i ett tidigt skede.

Författarna återger en tabell från FERC:s riktlinjer, med ett batteri av frågor och ett PFMA-tänk som integreras, för att ta fram ett bra dammsäkerhetsprogram. Exempel på frågor som behöver besvaras är:

- I vilket skede (eller vilken tid) kan en PFM-process upptäckas?
- Kan aktuell PFM upptäckas visuellt i tid (innan den utvecklas till dammhaveri)?
- Kan PFM detekteras med instrumentering?
- Hur snabbt kommer förloppet att utvecklas när det upptäcks?
- Finns det personal vid dammanläggningen som tränats på att upptäcka avvikelser och kan de detektera aktuell PFM?
- Vilka åtgärder ska vidtas om en PFM initieras och utvecklas i tidig och fortsatt fas?
- Kommer det att finnas tid för åtgärd när felmoden har upptäckts?
- Finns det någon lämplig instrumentering som kan upptäcka felmoden och var ska den bäst placeras?
- Vilka visuella inspektioner kan upptäcka felmoden och hur ofta behöver de utföras?
- Hur ofta behöver övervaknings- och mätdata samlas in och utvärderas?
- Hur kommer övervaknings- och mätdata samlas in och utvärderas?

2.3.3 Information om dammen samt mätinstallationerna

Författarna poängterar att varje instrument eller mätpunkt i en damm ska ha ett specifikt tydligt syfte. Om det inte har det ska det inte installeras. Detsamma gäller om ett befintligt instrument inte längre uppfyller ett syfte, då ska det tas bort.

"Instrumentering av en damm kan hjälpa till att identifiera källan och rotorsaken till ett problem och kan, dygnet runt, ge exakt kvantitativ mätdata, som visar utvecklingen med tiden. Visuella observationer och mätdata från instrumentering är naturliga komplement till varandra, och när de används tillsammans vid dammsäkerhetsutvärdering ger de sammantaget överlappande fakta för analysen."

Vidare skriver man *"Beteendet av en damm och dess egenskaper kommer att ändras över tid, och följdaktligen behöver även Performance Monitoring Program även ändras för att fånga detta. Förändringar kan ske genom normal åldring av ingående komponenter i dammar, genom uppkomst av svagheter beroende på fel vid utformningen eller byggande av dammen"*

I rapporten beskrivs ett systematiskt arbetssätt för att planera ett övervaknings-/mätprogram med hänvisning till Dunncliffe (1988, 1993). Arbetssättet består av följande tio aktiviteter:

1. Samla in och utvärdera information om dammen
 - Platsundersökningar och tillståndundersökningar.
 - Dokument från projektering och byggande.
 - Ombyggnader, om sådana genomförts.
 - Instrumenteringsprogram och mätningar.
2. Identifiera tänkbara förlopp för dammhaveri (potentiella felmoder)
 - Hur kan dammhaveri tänkas inträffa?
 - Vilka osäkerheter finns?
 - Vilka frågor behöver svar?
3. Identifiera mätningar som kan och bör genomföras
 - Definiera motiv för instrument för att ge svar på oklarheter och minska osäkerheterna.
 - Välj parametrar för mätning och frekvens för mätningarna.
 - Uppskatta mätområdet.
 - Identifiera möjliga åtgärder om mätningen skulle visa osäkra förhållanden.
 - Fördela ansvar och arbetsuppgifter.
4. Projektera lämpligt mätsystem
 - Välj instrument.
 - Välj plats för instrumenten.
 - Välj system för att samla in mätdata.
 - Upprätta varsel- och larmnivåer.
 - Upprätta tillvägagångssätt för kontroll av mätdata.
 - Lista syfte/anledning för varje instrument.

- Upprätta projekteringsrapport för instrumenteringen.
 - Skriv specifikationer för upphandling och installation.
 - Förbered budget och motiveringar för investeringen.
 - Revidera programmet vid behov.
5. Planera installation, kalibrering, underhåll, datainsamling och datahantering
 6. Upphandla, installera, testa, och ta systemet i drift
 7. Underhålla och kalibrera instrumenten
 8. Samla in, bearbeta och utvärdera data
 9. Tolka och rapportera resultat
 10. Vidta åtgärder vid behov
 - Om osäkerhet uppstår kan omarbetningar vara nödvändiga.
 - Ändra mätfrekvensen.
 - Reparera, ersätt, lägg till eller ta bort instrument.

För vidare information om dessa tio steg hänvisas till De Melo och Conkle (2024) samt Nilsson (2014).

Instrumenteringsdata samlas in och används för att övervaka specifika parametrar som är relaterade till de identifierade potentiella felmoderna, vilket ofta är ett resultat av riskanalyser för att hantera säkerhetsrisker. Denna data används även i datadrivna övervakningsmodeller, som prediktiv analys och prognosverktyg, samt för att fastställa dynamiska larmsystem.

2.3.4 Övrigt – Några kommentarer

I De Melo och Conkle (2024) beskrivs övervakning av dammar utifrån tre kategorier av risknivå, nämligen: låg potentiell risk, medelhög potentiell risk, samt hög potentiell risk.

Så länge det är de faktiska felmoderna för dammarna som instrumenteras utifrån denna indelning harmoniserar grundtankarna generellt med tänket i dagens RIDAS. Det finns emellertid en risk att uppkomsten av felmoden helt missbedöms, eller inte alls beaktas/analyseras. Detta exempelvis om endast dammsäkerhetsklassen styr nivå och omfattning på analysarbetet med avseende på dammsäkerhet. Det är vitalt att dammen har rätt dammsäkerhetsklass eftersom de faktiska konsekvenserna vid haveri styrs av denna.

De Melo & Conkle (2024) avslutar med följande visdomsord: *"The dam owner should develop a culture of dam safety awareness throughout the organization. Everyone involved in the operation, maintenance, and performance monitoring of the dam should understand the dam safety program, the performance monitoring program, and the triggers that require action responses. The need for and value of ongoing maintenance and upgrade programs for performance monitoring systems cannot be underestimated. Maintenance includes periodic calibration of instruments, cleaning, repair, or replacement when necessary. Advances in*

instrumentation and monitoring equipment and technology should be periodically considered to enhance existing monitoring programs. Periodic training of people responsible for every aspect of dam safety performance monitoring should be a priority."

3 Motiv till att mäta och utvärdera

Genom att kombinera mätning och utvärdering med annan information av betydelse för utvärdering av dammdelen fås goda förutsättningar att förstå betydelsen av de förändringar som kan ske i en damm. I många fall utförs mätning respektive utvärdering av olika personer, vilket kan komplicera den övergripande tolkningen. Syftet med detta kapitel är att ge verktyg, inspiration och kunskap för att bättre kunna tolka mätdata, oavsett om det görs inom dammägarens organisation eller av konsulter. För en samlad dammsäkerhetsbedömning är kvaliteten på mätdata, tillgänglig dokumentation, samt utförarens erfarenhet av grundläggande betydelse. "Mät mindre – utvärdera mer" är budskapet.

3.1 VARFÖR BEHÖVS ÖVERVAKNING?

Att mätning är en av hörnstenarna vid övervakning av dammar är en självklarhet. Omfattningen och ambitionsnivån beror däremot på flera faktorer som varierar mellan olika länder. I Sverige beror det främst av dammägarens huvudprinciper (RIDAS), strikt ansvar och egenkontroll samt myndighetstillstånd. Exakt vad som ska mätas avgörs av dammägaren, som även ansvarar för utvärdering av mätdata. Mätning och utvärdering utgör tillsammans grunden för att kunna avgöra dammens aktuella dammsäkerhetsstatus. Detta utgör också grundtanken i det begrepp som beskrivs utförligt som "Dam Performance Monitoring" av (De Melo & Conkle, 2024). Olika aspekter lyfts fram såsom riskvärdering, mätbehov under dammens livscykel och riskreduktion genom mätningar, vilket även belyses med några exempel.

Vissa delar har lyfts fram i föreliggande rapport och sammanfattats i detta kapitel samt även i kapitel 2 och 5.

3.2 VAD VILL MAN UPPTÄCKA?

Det grundläggande syftet med all mätning är att upptäcka förändringar som kan försämra dammens funktion eller påverka dess säkerhet. För detta krävs flera steg, vilka kan sammanfattas i två huvudsteg:

- Mät med olika metoder och presentera resultatet på ett pedagogiskt och tydligt sätt för att underlätta tolkning.
- Ta fram rutiner, med lämpliga hjälpfunktioner, för dokumentation, utvärdering och rapportering.

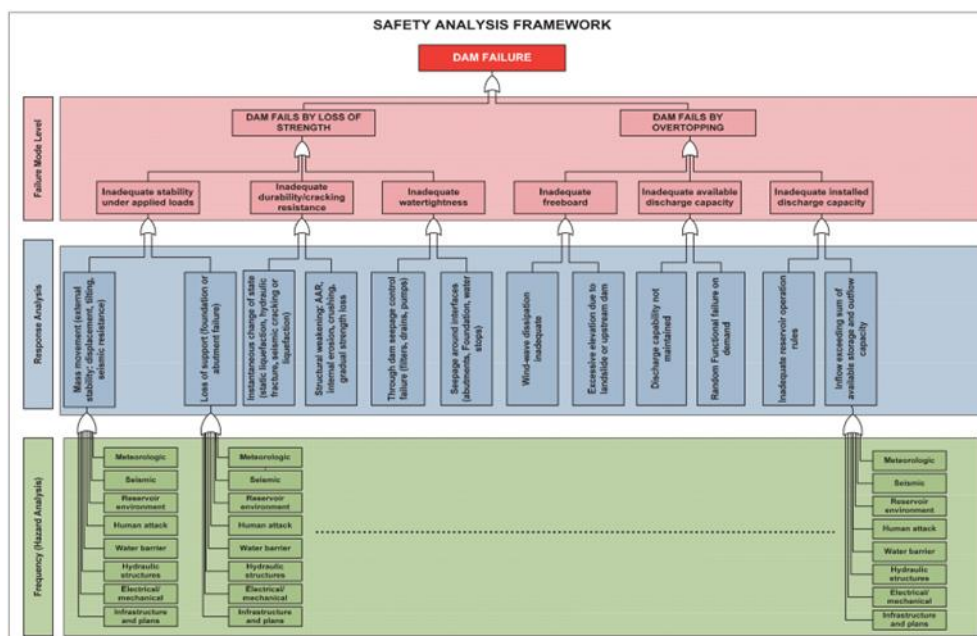
Båda stegen innehåller ett flertal viktiga moment som kalibrering av givare, kvalitetskontroll av mätdata, datahantering, hantering av varningsnivåer etc.

De två huvudstegen kan tyckas självklara och enkla men erfarenheterna visar att så inte alltid är fallet. Mindre och dessvärre även någon gång större brister inom dessa områden har förekommit, vilket framkommit vid haveriutredningar.

I De Melo & Conkle (2024) har några riktlinjer tagits fram beträffande mätning och utvärdering av data, där kapitel 7 rekommenderas att läsas i sin helhet. I rapporten finns också exempel på incidenter och haverier presenterade från vilka erfarenhetsåterföring kan göras.

3.3 FELMODER

För övervakning och kontroll av dammar samt analys av dammsäkerhet är ett betraktelsesätt utifrån felmoder centralt. Genom att identifiera och övervaka relevanta felmoder för dämmande delar (dammarna och undergrund) och avbördande funktion kan säkerheten i anläggningsdelar och dammar förbättras/uppnås. I litteraturen förekommer det viss begreppsförvirring vad avser betydelsen av termer som felmoder, felmekanismer, felsätt och felfunktion. I internationell litteratur behandlas felmoder exempelvis generellt i ICOLD Bulletin 154 (Figur 3-1) och för fyllningsdammarna (Fell, Foster, Cyganiewicz, Davidson, & Sills, 2024).



Figur 3-1 "Fault tree Model of Hazards and failure modes" från (ICOLD, 2017)

Wolfsborg (2025) har definierat en systemteknisk begreppsmodell för funktionsfäll på dammar. Enligt denna definieras centrala nyckelbegrepp enligt:

- Felorsak:** (Omständigheter som initierar en felmekanism).
- Felmekanism:** (Process som driver felutveckling).
- Felmod:** (Det sätt på vilket ett fel uppstår).
- Feleffekt:** (Resultat av en felmod).

I denna rapport görs inte anspråk på att återge en komplett bild av felmoder inom dammsäkerhetsområdet. Ambitionen har snarare varit att sammanställa relevanta felmoder för svenska förhållanden inom dämmande funktion, som en utgångspunkt för att diskutera övervakningsbehov. Övervakning behöver ske på en

lämplig upplösningsnivå för att effektivt kunna följa initiering och utveckling av en identifierad felmod.

Nedan exemplifieras felmoder inom områdena Fyllningsdammar och anslutningar samt Betong- och murverksdammar efter De Melo och Conkle (2024).

3.3.1 Fyllningsdammar och anslutningar

Baserad på internationell erfarenhet lyfter De Melo och Conkle (2024) upp följande orsaker till dammhaveri och incidenter gällande fyllningsdammar (Tabell 3-1). För svenska förhållanden i vattenkraftdammar finns förutsättningar för alla dessa övergripande felmoder, möjligen med undantag för nr 8. De vanligaste förekommande felmoderna för svenska förhållanden bedöms vara 1, 3, 4 och 7. I tabellen har även listats vilka mätparametrar som är relevanta för upptäckt eller uppföljning av respektive felmod. Som framgår är läckage- och tryckmätning viktiga mätparametrar.

Tabell 3-1 Sammanställning av felmoder (De Melo & Conkle, 2024), samt bedömning av lämplig/vanlig mätparameter för upptäckt.

Felmod	Beskrivning	Mätparameter
1	Överströmning av dammen pga. otillräcklig utskovskapacitet, igensättning av utskov eller lokalt vid sjunkgrop eller sättning av dammkrönet.	Magasinsnivå, nederbörd. Vid sjunkgrop även rörelser och läckage
2	Erosion av dammen pga. skada i en genomgående utskovsanordning, vilket medfört kraftig utströmning av vatten med erosion av material.	Läckage
3	Vattenströmning vid anslutning mot betongpelare som utskov/intag, eller mot bergytan.	Läckage och tryck
4	Inre erosion (piping /suffusion) i tät kärnan orsakad av undermåligt filter, dålig packning, stenseparation etc.	Läckage och tryck
5	Utglidning av fyllningsmaterial pga. för branta slänter vid kraftig långvarig nederbörd, snabb avsänkning, ökade porttryck eller förhöjd vattenströmning genom dammen.	Rörelser, tryck och läckage
6	Utglidning av dammen vid förekomst av underliggande lager med låg hållfasthet.	Rörelser, tryck och läckage
7	Uppkomst av sprickor pga. differentialsättningar.	Rörelser och läckage
8	Liquefaction (statisk eller dynamisk).	Svårt att mäta

Ovanstående felmoder är generella och behöver anpassas och utvidgas för att kunna inkludera erfarenheter och förutsättningar som är representativa för svenska dammar/den aktuella dammen. Dessutom måste man beakta att betydande variation i förhållanden kan förekomma längs en damm, avseende exempelvis grundläggning och utförande av tätjord och filter m.m., där osäkerheterna kan vara stora.

3.3.2 Betong- och murverksdammar

De Melo och Conkle (2024) definierar fyra generella felmoder för betongdammar, (se felmod 1 till 4 i Tabell 3-2). I alla dessa finns en tydlig samverkan med undergrunden, dvs. flera likheter finns med de felmoder som gäller för fyllningsdammar. För att bedöma mät- och övervakningsbehov baserat på felmodsanalys finns därför stora likheter mellan de båda dammtyperna av betong och jordfyllning.

De Melo och Conkle (2024) behandlar även frågeställningar kring kemiska cement-ballastreaktioner. Detta är emellertid inte något generellt problem för svenska dammar. Ballastmineral med alkalilöslig kiselsyra förekommer dock i fjällkedjan och i Skåne (Kraftverksföreningens Utvecklingsstiftelse, VAST, 1991).

Ingen av de felmoder som De Melo och Conkle (2024) räknar upp beaktar den försämring av betongens egenskaper som sker över tid i gamla betong- och murverksdammar som finns i Sverige (urlakning, armeringskorrosion, frostsador och andra betongskador). Inte heller försämring av dränering som hanterar upptryck omnämns specifikt. Tabell 3-2 har kompletterat med felmod 5 och 6 som beaktar detta.

Tabell 3-2 Sammanställning av felmoder, samt bedömning av lämplig mätparameter för upptäckt.

Felmod	Beskrivning	Mätparameter
1	Överströmning av dammen pga. otillräcklig utskovskapacitet, igensättning av utskov, med följd av erosion vid dammtån, bristande stabilitet av dammen eller intilliggande dammdel.	Magasinsnivå, nederbörd, läckage och nedströms vattennivå
2	Förhöjd vattenströmning i undergrund (erosion i jord eller av jordfyllda sprickor i berg), vilket även kan medföra lägre hållfasthet.	Rörelser, tryck och läckage
3	Glidning på grund av svaghetszoner på grundläggningsytan eller i undergrunden.	Rörelser, tryck och läckage
4	Urlakning av t.ex. kalk i underliggande lager och cement i injekteringsskärm i undergrunden, vilket kan medföra ökat läckage och försvårade stabilitetsförhållanden.	Läckage och tryck
5	Försämring (nedbrytning) av betong eller armering i dammkroppen med förminskad	Ytliga skador, sprickvidd,

	hållfasthet, ökad vattenströmning och otillräcklig hållfasthet.	provtagning, tryckhållfasthet och läckage
6	Igensättning av dränering under betongdammen medför ökade upptryck och glidning eller stjälpning.	Rörelser, tryck och läckage

Mätning/upptäckt av förändringar för dessa svagheter görs ofta på ett mer detaljerat sätt än för de mer övergripande svagheter som förekommer i fyllningsdamm, anslutningar och undergrund. Mätmetoder för betongspecifika frågeställningar har därför utelämnats i denna rapport.

3.4 MÄTPARAMETRAR

Av de parametrar som mäts på såväl fyllnings- som betongdamm är mätning av vattentryck och läckage vanligast. Mätning av dessa parametrar görs på alla större dammar och är centrala i all dammövervakning, vilket framkommit ovan. Motivet till att mäta dessa parametrar är att de ger information om dammens grundläggande funktion, dvs dess stabilitet och täthet. Historiskt sett mättes speciellt vid första dämningssupptagningen, eller under dammens första fem år, innan man fullt upp insåg betydelsen av fortlöpande mätningar under drifttiden.

Även rörelsemätning är mycket vanligt förekommande. Dessa mätningar utförs för att följa dammens rörelser såväl horisontellt som vertikalt. Dagens teknik, baserad på satellit och/eller drönare, möjliggör ännu bättre möjligheter idag än vad som varit möjligt historiskt med punktmätning.

För betongdamm är även temperaturmätning en grundläggande parameter eftersom rörelser kan uppkomma i betongdamm på grund av temperaturförändringar, vilket kan ge upphov till sprickbildning. Temperaturmätning i fyllningsdamm är numera också en vanlig metod för läckageövervakning.

Visuell observation är en klassisk, men ofta underskattad metod, som fortfarande används och inte kan ersättas fullt ut av någon av de mätmetoder som finns idag. Denna metod är kanske också den som historiskt upptäckt flest svagheter. En av orsakerna kan vara att den mänskliga förmågan kan integrera flera observationer och även täcka in hela dammens yta, samt inte minst integrera mätdata med den förståelse för konstruktionens beteende som byggs upp genom upprepade observationer (inspektioner). Här finns säkerligen potential för tillämpning av AI-teknologi för bildanalys av data insamlade från fasta eller rörliga (drönare) kameror för mätning över olika våglängdsområden (Svensson, 2015).

Meteorologiska data i form av nederbörd (regn och snö), lufttemperatur, vindstyrka och vindriktning är viktig information, men av mer sekundär betydelse. Men dessa parametrar är även viktiga eftersom de indirekt påverkar magasinsnivån, vilken måste beaktas vid utvärdering av exempelvis tryckmätningar som utförs i dammen och dess grundläggning.

Ytterligare sekundär information kan fås genom geofysiska data, som oftast ger indirekt information från andra parametrar som kan indikera förändring av vattenströmning eller materialförändringar.

3.5 REPRESENTATIVITET

För att kunna göra bra jämförelser mellan olika mätparametrar är det nödvändigt att förstå vad mätningarna representerar. I vissa fall ges mätresultat i form av detaljerad information i enstaka punkter, medan andra mätresultat beskriver vad som händer över större områden. En grundläggande förståelse för vad en mätning representerar är därför nödvändig vid jämförelse och analys av flera mätparametrar.

3.5.1 Mätning i enstaka punkter – 0 dimension

Mätning i enstaka punkter (0D) i en damm kan göras av exempelvis tryck, rörelse, temperatur och nederbörd. Beroende på var och hur givaren är installerad, samt hur representativ den lokala informationen är, ska mätresultatet tolkas och värderas för att kunna representera hela eller delar av dammen/anläggningen. Oftast antar man att mätningen utförts i "värsta" punkten. Detta behöver dock inte var fallet, vilket medför att man med stor sannolikhet antingen under- eller överskattar betydelsen av ett isolerat mätvärde. Utmaningen är att ha förståelse för **var** mätpunkten är belägen, **vad** mätvärdet representerar i sammanhanget och anpassa tolkningen efter detta. Nedan följer två exempel med mätning i en punkt.

Tryck är en parameter som mäts i en punkt, exempelvis genom att mäta vattennivån i ett vattenståndsrör. Vid tolkning av mätdata är det viktigt att man har god kännedom om vattenståndsrörets utformning avseende filtrets läge, omgivande jordmaterial, filterspetsens utformning och hydrauliska kapacitet, rörets funktion (läckande skarvar, igensättning etc.), samt inte minst, tryckgivarens prestanda. Placering av vattenståndsrör i tätjord ger lokal information om trycket (inom någon eller några meter), medan placering i permeabelt vattenmättat material ger motsvarande information över ett större område (tiotals meter eller mer). Tryckökning vid belastning blir dock större i tätjord än i permeabelt material i dammen på grund av skillnad i hydraulisk konduktivitet, varför den blir lättare att upptäcka tryckförändringen där. Detta faktum måste dock vägas mot att informationen i den impermeabla jorden är mer lokal och därför begränsad till ett mindre område än om mätning görs i permeabelt material (se vidare i avsnitt 4.1.3).

Rörelse mäts i enstaka punkter på dammar genom dubbar placerade på krönet, tätkärnans krön eller slänterna. Mätning kan utföras med viss regelbundenhet eller kontinuerligt. Vid kontinuerlig mätning kan GPS-mätning vara ett alternativ, vars prestanda utvecklats mycket de senaste åren.

Informationen från rörelsemätningen är lokal, speciellt vid mätning på slänter bestående av grov stenfyllning, där lokala rörelser av enstaka block kan uppkomma på grund av omlagringar, nedbrytning, frostsprängning,

sättningar i undergrund, påverkan från islast etc. Vid mätning på ett dammkrön eller i tät kärnan fångas globala rörelser av dammen främst orsakat av konsolideringssättning av tät kärnan eller sättning i undergrunden. Lokala rörelser som uppkomst av ett sjunkhål eller en lokal svacka kan förbigås beroende på avståndet till mätpunkten eftersom avståndet mellan mätpunkter ofta är 50–100 m eller mer.

För att förbättra förståelse och tolkning av tryckmätningar kan det vara motiverat att placera flera mätpunkter i närheten av varandra, men i olika material, samt på olika nivåer och lägen längs eller tvärs dammen

Mot bakgrund av den lokala information som generellt erhålls vid punktmätning ges följande råd beträffande tolkning:

- Man bör vara försiktig/noggrann vid tolkning av absoluta värden från enstaka mätpunkter.
- Försök om möjligt jämföra mätresultat från mätning i liknande lägen/material etc.
- Fokusera även på att ta fram relativa förändringar, där mätresultat från motsvande tidpunkter, vattenstånd etc. finns.
- Inkludera information beträffande dammens konstruktion, drifterfarenheter, samt eventuella erfarenheter från liknande dammar.
- Multitolkning av tillgänglig information.

Ett bra exempel som visar vikten av noggrann tolkning även vid till synes små förändringar i tid i enstaka punkter finns redovisat i (Nilsson, Torstensson, & Nilsson, 2015). Där visas resultat från tryckmätningar i några vattenståndsrör placerade i nedströms stödfyllning i en 50 år gammal fyllningsdamm med tät kärna av morän och en träskärm. Från att ha visat stabila tryck under många år upptäcktes en svag trycknivåökning av 3, 4 respektive 9 mm/år i tre mätrör. Läckagemätningarna visade inte på någon förändring. Mot bakgrund av utvecklingen av tryckökningen och dammens konstruktion (speciellt frågor kopplade till träskärmens kondition) initierades ytterligare undersökningar. Detta medförde att flera åtgärder utfördes för att förstärka dammen.

3.5.2 Mätning längs en linje – 1 dimension

Mätning längs en linje (1D) kan göras horisontellt eller vertikalt. Sådana linjer ger i många fall bättre möjligheter att förstå var något sker, samt vad som sker, jämfört med mätning i enstaka punkter. De vanligaste mätparametrarna som kan ge information längs en linje är rörelse, tryck och temperatur.

Linjär information av **rörelser i horisontal** fås genom inklinometer, som kan mäta vid enstaka tillfällen eller förses med givare för kontinuerlig mätning. Upplösningen längs mätlinjen varierar mellan olika utrustningar och beroende på grundprincip (mekanisk lutningsgivare eller baserad på mätning i optisk fiber, eller ShapeAccelerometerArrays, SAA).

Rörelser i vertikalled på dammens överyta eller på tätkärnans krön kan mätas med hydraulisk mätning, inmätning av peglar, förutom med de metoder som nämndes ovan.

Temperaturmätning kan utföras **vertikalt** i vattenståndsrör, antingen manuellt eller med optisk fiber/temperaturlinor. Genom mätning ges information om vattenströmning på olika nivåer. Vid mätning **horisontellt** längs dammen, fås på samma sätt, information om var vattenströmning sker.

Generellt är mätning längs en linje enkla att tolka eftersom jämförelse fås direkt med intilliggande värden. Avvikelse i rummet framkommer då tydligt. Vid kontinuerlig mätning fås även information om när avvikelsen uppkommer eller förändring sker, vilket då kan korreleras mot säsongsvariation av exempelvis vattenstånd eller vattentemperatur.

3.5.3 Mätning av en yta – 2 dimensioner

Mätning av ytor (2D) kan göras på många sätt och tekniken har utvecklats kraftigt genom användning av satelliter, drönare, undervattensfarkoster etc. Dessa mätenheter kan utrustas med flera typer av instrument. Upplösningen på mätningarna förbättras succesivt, vilket medför att bra information kan fås.

Mätning av **rörelser** på plan eller lutande yta kan exempelvis göras från satellit (InSAR) eller med markbaserad utrustning (Lidar). Mätning av rörelser/förändringar under vattenytan kan göras baserad på akustisk teknik ofta i kombination med kameror.

Markytans **temperatur** kan mätas genom användning av termokamera, vilken ger högupplösta och noggranna mätningar. Mätning görs bäst med användning av drönare, som kan utrustas med konventionell kamera för bilddokumentation.

Även konventionell **läckagemätning** (insamling i dränageledning och mätning i mätbrunn) utgör egentligen mätning över en yta. Även om bestämning av läckageflödet görs i en punkt (mätöverfallet), samlas läckaget in längs en viss sträcka av dammen, som har en viss höjd. Mätvärdet representerar alltså egentligen ett medelflöde över en yta.

Tolkning av bildinformation kan göras genom jämförelser mellan olika bilder av samma typ, eller genom att lägga samman bilder av exempelvis av topografi, temperatur eller rörelser. Eftersom mätning sker på olika sätt, ökar möjligheten att upptäcka förändringar. Jämförelse kan göras mellan mätningar vid olika tidpunkter.

Vid tolkning av läckagemätning fås ingen bildinformation över vad som sker över den yta som mätvärdet representerar. En signifikant och lokal läckageökning kan därför ge en liten ökning av medelvärdet, medan flödesökningen kanske varit stor och skett över ett mindre område. Lokalt kan betydligt högre läckageökningar således förekomma än det som mäts integrerat, vilket måste beaktas vid tolkning av läckagemätningar.

3.5.4 Mätning av en volym – 3 dimensioner

Mätning av egenskaper i en volym (3D) görs med användning av geofysiska metoder som exempelvis resistivitet och seismik. Mätning görs oftast längs en mätlinje, där resultatet visas som en längdprofil längs mätsträckan längs eller tvärs dammen (2D). Flera mätlinjer tillsammans gör att presentation kan göras i 3D.

Generellt kräver geofysiska metoder avancerad bearbetning av mätdata för att presentera resultatet på ett användbart sätt. Metoderna är indirekta där flera parametrar påverkar mätvärdet. Detta medför att tolkningen blir komplicerad, då vissa ingående parametrar normalt är okända och därför ofta antas vara konstanta.

Resistiviteten beror dels av jordmaterialets egenskaper, dels av vatteninnehållet/porositeten, samt temperaturen. Porositeten påverkar även ljudvågshastigheterna i materialet, vilket även är grunden för seismiska metoder.

Generellt gäller för geofysiska metoder att såväl mätnoggrannheten som upplösningen försämras med undersökningsdjupet. Detta innebär att tolkning av resultat måste beakta att osäkerheten ökar med ökande mätdjup.

3.5.5 Långtidsmätning - ytterligare en dimension

Genom flera mätningar med lämplig frekvens, eller ännu hellre kontinuerlig mätning över tid, förbättras möjligheterna att upptäcka avvikelser i dammar. Detta gäller oavsett om mätningarna representerar 0D, 1D, 2D eller 3D. Det innebär att vi kan lägga till tidsdimensionen och på så sätt få data med ytterligare en dimension.

Upprepade mätningar är därför grunden vid övervakning av dammar för att kunna upptäcka förändringar med tiden. Tolkning kan då göras baserat på de relativa förändringar som sker. Mätresultat behöver dock även relateras till säsongsvariationer av magasinsnivå, nederbörd, snösmältning, vattentemperatur, lufttemperatur etc.

4 Vad kan mätningar ge svar på?

I detta kapitel ges exempel på vad som kan mätas, vad resultaten visar, vilken noggrannhet/känslighet olika parametrar har, samt vilka osäkerheter som bör beaktas. Detta exemplifieras genom simulering av några skador i en damm där mätbara förändringar uppkommer. Syftet med kapitlet är att ge en bättre förståelse vid tolkning av mätdata. Innehållet är riktat till personer som analyserar dammars funktion och utvärderar av olika typer av mätningar. Simuleringsexemplen visar också hur resultatet kan användas för bestämning av gränsvärde/larm/varningsnivå.

4.1 Fyllningsdamm

Generellt är det vid tolkning och analys svårt att uppskatta betydelsen av en förändring av ett mätvärde i en damm eftersom man sällan eller aldrig med säkerhet kan avgöra exakt var förändringen skett eller vad som är orsaken till att den uppkommit. Som beskrivits i kapitel 3 kan ett mätvärde vara representativt för en punkt, en linje eller en volym. Ovan exemplifierades detta faktum med läckagemätning i ett mätöverfall, där läckageflödet insamlats utmed en delsträcka av dammen. I sådana fall är det svårt att avgöra huruvida läckaget är jämnt fördelat eller om det är ett begränsat område som bidrar till huvuddelen av uppmätt läckage. Detta är en utmaning vid tolkning. I vissa fall kan erfarenheter från liknande exempel vara till hjälp vid ingenjörsmässig analys.

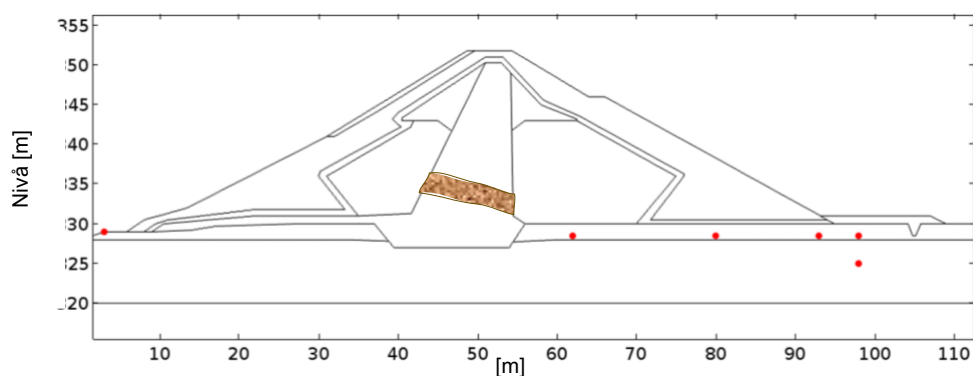
Ett förbättrat och fördjupat underlag, vid tolkning av mätresultat och –data, kan erhållas genom numeriska beräkningar, vilket blivit alltmer vanligt vid dammsäkerhetsanalyser. Dels ger beräkningar, baserad på en modell som representerar dammens fysikaliska beteende väl, vägledning om förväntade mätvärden, dels finns goda möjligheter att variera olika materialparametrar och laster i känslighetsanalyser för att kunna ringa in beteendet lokalt och globalt och bedöma aktuell situation. Dessutom kan varselnivåer/gränsvärden fastställas för dammen för att underlätta operativ förståelse för förväntade värden vid dammätning och för att fatta beslut, samt nyttjas vid framtida utvärdering och tolkning. En annan möjlighet med modellering är att simulera skador och svagheter i den dämmande funktionen, exempelvis att en del av tät kärnan har avvikande täthet, inre erosion genom "piping", sättning i dammkrönet. Ytterligare en möjlighet är att studera effekter av en reparation av dammen etc.

Bland frågeställningar som kan studeras kan nämnas: trycknivå i undergrund (t.ex. artesiskt tryck) och i dammkroppen, tät kärnans genomsläpplighet, filteregenskaper, inre erosion, deformationer, injekteringsstatus, stabilitet, samt tjälinträngning. Parametrar och laster som kan varieras är exempelvis ingående jordmaterials geotekniska egenskaper i dammen och grunden, packnings-egenskaper och lagringstäthet (portal), hydraulisk konduktivitet, magasinsnivå, temperatur, belastning på dammkrön, igensatt dränage m.m.

Beräkningar med numerisk modellering kan göras i två eller tre dimensioner. Några exempel på vad som kan framkomma vid sådana simuleringar framgår av nedanstående exempel.

4.1.1 Plötslig läckageökning i 2D

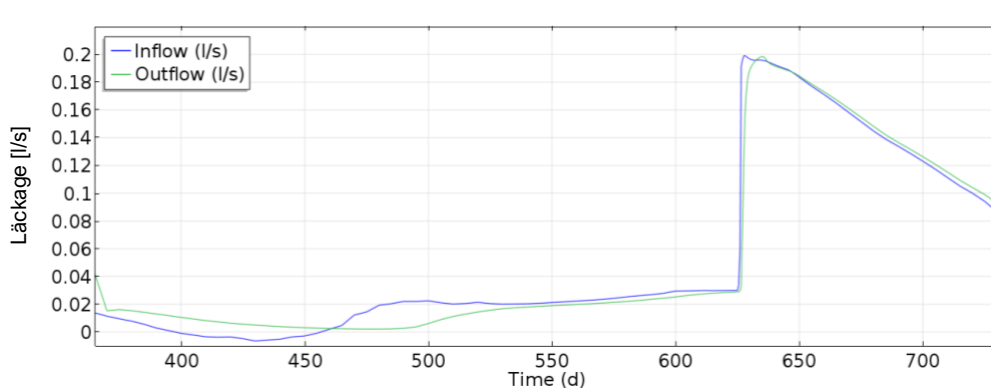
Komplettering av mätningar (läckage, tryck och temperatur) studerades för en ca 25 m hög fyllningsdamm (Figur 4-1). I exemplet har vissa detaljer modifierats. Vattenståndsvariationen i magasinet under året uppgår till ca 16 m. Den primära frågan var att finna en lämplig placering av mätning av tryck, som komplement till befintlig läckagemätning med mätöverfall. De lägen som studerades för vattenståndsrör visas som röda punkter i Figur 4-1.



Figur 4-1 Tvärsektion av en damm med studerade lägen för tänkta vattenståndsrör (punkter visade i rött), samt utbredning av antagen skadad permeabel zon genom tätjärnan.

Som skada i tätjärnan antogs en lokal ökning av hydraulisk konduktivitet med 100 gånger i en två meter hög zon i tätjärnans nedre del (Figur 4-1). Beräkningar utfördes för två år med samma säsongsvariation av vattennivå i magasinet och temperatur. Läckageökningen antogs inträffa plötsligt vid tiden $t = 625$ dygn.

Resultat från beräkningarna visade att en läckageökning skedde från ca 0,03 till 0,2 l/(s·m) vid fullt magasin (Figur 4-2). Vattenströmning sker i detta fall både genom dammen och undergrunden.



Figur 4-2 Beräknat läckage under senare delen av simuleringstiden (380–730 dygn). Antagen skada antogs ske efter 625 dygn. Skillnaden mellan utflöde (grön kurva) och inflöde (blå kurva) beror på magasinering i jordmaterialet (samt visst modelleringsfel). Magasinet nivå framgår av Figur 4-3.

Det läckageflöde som mäts i mätöverfallet samlas in i en dränageledning i dammtån längs en sträcka av 300 m. Vid fullt magasin med vattennivån vid DG och för en intakt damm (utan skada) blir flödet i mätpunkten sammantaget ca 9 l/s ($0,03 \text{ l/(s}\cdot\text{m)} \cdot 300 \text{ m}$).

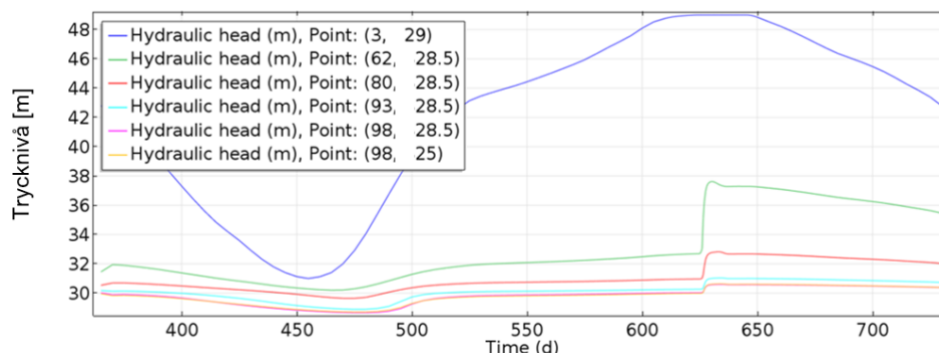
Om man i stället räknar läckaget för en skada som har en utbredning av en meter ökar läckaget med 0,17 l/s, dvs. till totalt ca 9,2 l/s. Ökningen motsvarar ungefär 2% av totala flödet. För att med säkerhet kunna uppmäta denna förändring fordras att dränaget kan fånga in allt läckage, samt att korrektion kan göras för nederbörd och snösmältning vid tillfället.

Om vi nu antar att skadan har större utbredning, säg 10 m, blir ökningen ca 1,7 l/s (dvs. en ökning med ca 19% av det totala flödet). I detta fall borde läckageökningen kunna detekteras med större säkerhet. Generellt gäller att om läckaget kan samlas in effektivt är läckagemätning en utmärkt övervakningsmetod. Detta eftersom allt läckage från dammen då mäts. Det går dock inte att veta exakt var skadan uppkommit. För att öka den kunskapen behövs möjligt läckageområde ringas in genom exempelvis visuell kontroll av tillsynsbrunnar i dränagesystemet, filmning med kamera av dränageledningen eller genom temperaturmätning i dammtån.

Men, detta exempel illustrerar också en svaghet med att samla in och mäta läckage över stor mätlängd. En smärre uppmätt läckageökning, orsakat av ett visst flöde, kan lokalt innebära en större påfrestning för dammen än vad ett högre uppmätt totalt läckageflöde, orsakat av mindre flöde per längdmeter men med större utbredning, gör. Vid tolkning av uppmätt läckageökning måste denna osäkerhet beaktas. Kompletterande information, om sådan finns, bör inkluderas vid tolkningen innan några definitiva slutsatser kan dras. Det är författarnas erfarenhet att man vid utvärdering av förhöjt läckage sällan härleder ursprungets storlek i detalj varför risken finns att en mindre läckageökning i ett mätöverfall ignoreras dammsäkerhetsmässigt.

I detta simuleringsfall finns även information från ett antal tryckmätningar i vattenståndsrör på olika avstånd (3, 62, 80, 93 och 98 m) nedströms dammlinjen (Figur 4-3). I alla dessa rör ses en tryckökning då skadan uppkom (varierande från ca 0,5 m till ca 8 m). Den största tryckökningen sker i punkten närmast dammlinjen, punkt (62, 28,5), vilken är enkel att upptäcka. Om mätning sker i närheten av skadan finns därför goda möjligheter att få en tidig indikation på en förändring ("early warning"). Problemet är dock att detta kräver ett stort antal mätpunkter längs dammen.

Trycknivån i punkterna längre nedströms (98, 28,5) och (98, 25) är så gott som identiska. I det här fallet är även tryckökningen, som det plötsliga läckaget orsakar, större än den trycknivåvariation som förekommer för övrigt under året. Detsamma gäller även i punkten (93, 28,5). Detta innebär att magasinsnivå måste beaktas vid bestämning av lämpliga varselnivåer/gränsvärden.



Figur 4-3 Beräknade trycknivåer under senare delen av simuleringstiden (380–730 dygn) i olika mätpunkter (3, 62, 80, 93 och 98 m nedströms dammlinjen) där siffrorna inom parentes anger punktens koordinater (jfr. de röda punkterna i Figur 4-1). Den blå kurvan i figuren anger magasinsnivån.

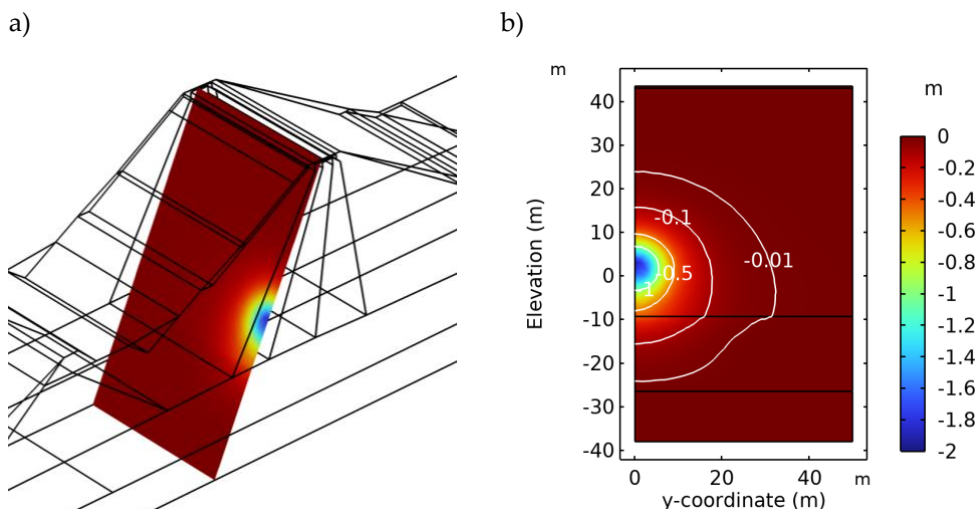
4.1.2 Tryckmätning i uppströmsfilter

Eftersom tryckmätning i ett vattenståndsrör sker i en punkt inses att 2D-exemplet ovan är en förenkling av verkligheten. En beräkning i 3D ger därför en bättre bild av hur en tryckfördelning verkligen sker då påverkan även uppkommer parallellt med dammlinjen.

Tryckmätning utförs oftast i dammens nedströmsdel, men mätningar i dammars uppströmsfilter kan även ge värdefull information i vissa fall, speciellt då magasinsnivån uppvisar en liten variation. Med en normalt fungerande tät kärna sker inget mätbart tryckfall i uppströms stödfyllning eller i uppströmsfiltret. Vid en skada i tät kärnan, och därmed tillhörande läckageökning, uppkommer ett tryckfall, som kan mätas i uppströmsfiltret. Tryckfallets storlek lokalt i dammen beror på skadans storlek och lokalisering samt hydrauliska egenskaper i angränsande material i dammen. Detta har visats vid mätningar, liksom även det omvända efter reparation av en skadad tät kärna.

I exemplet nedan (Figur 4-4), visas tryckreducering för en lokal cylinderformad skada, belägen i dammens symmetriplan. Den hydrauliska konduktiviteten i skadeområdet har antagits öka både i filter och tätjord, vilket resulterat i en flödesökning av 1,0 l/s genom skadan. Om vi antar att tryckmätning kan göras med en noggrannhet av 0,1 m skulle effekter av skadan kunna upptäckas på avståndet ca 18 m.

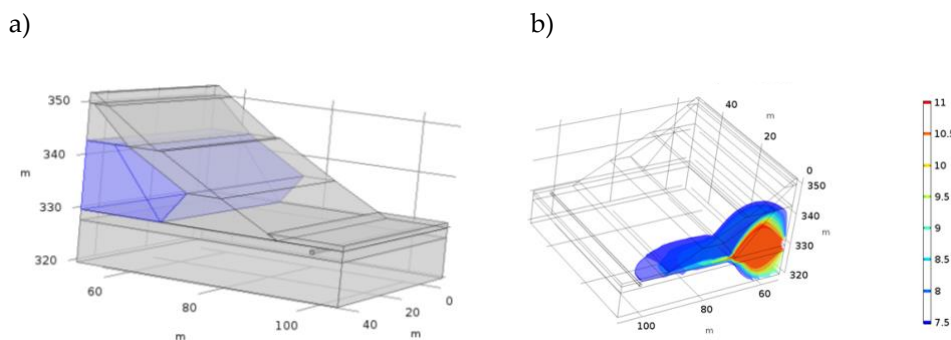
Med detta exempel inses att om man vid dammätning upptäckt en tryckminskning av exempelvis 0,2 m kan man dra slutsatsen att något har hänt i dammen. Var vattenströmningsökningen som orsakat trycksänkningen skett är dock oklart, liksom hur stort läckaget är. För att komma vidare för att bedöma betydelsen av mätningen måste därför ytterligare mätpunkter tillkomma, lämpligen på vardera sidan om den ursprungliga mätpunkten. Kompletterande mätningar är därför alltid att rekommendera när avvikelser av betydelse har uppkommit och verifierats.



Figur 4-4 Tryckförändring i ett plan i uppströmsfiltret vid en lokal cylinderformad skada med flödet 1 l/s (a) samt projicerad bild med trycklinjer för avsänkning av trycket med 1,0; 0,5; 0,1; och 0,01 m (b).

4.1.3 Plötslig läckageökning i 3D

En annan aspekt vid tolkning av mätdata är att förstå hur snabbt en mätbar förändring uppkommer vid en plötslig skada. Även detta kan modelleras, och detta företrädesvis i 3D (Figur 4-5a). I detta fall antas att en plötslig läckageökning på 4 l/s uppkommit genom en lokal cylinderformad skada genom tåtkärnan (jämför med temperaturutbredningen i Figur 4-5b). Skadan antas ske momentant och vattentryck, läckage och temperatur studeras i detta fall i dammens nedströmsdel.

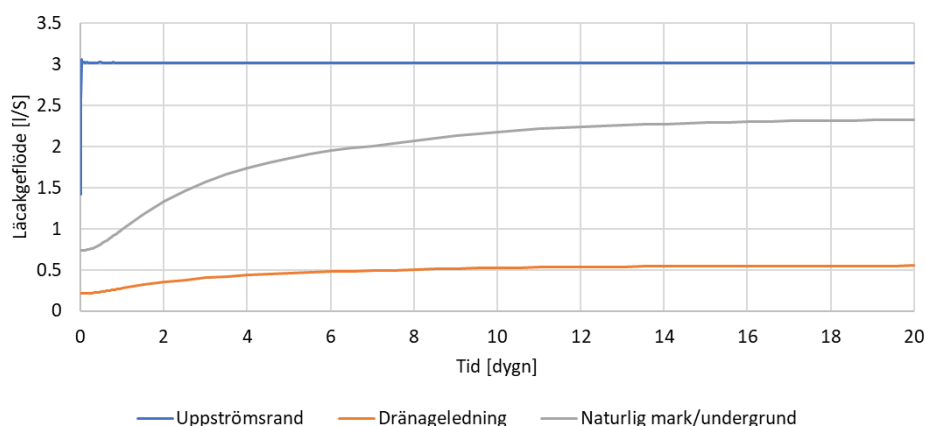


Figur 4-5 3D-modell för simulering av skada i tåtkärnan (a) samt läge för skadan och resulterande temperatur efter 13 dygn (b).

Den läckageökning som skadan ger upphov till medför att vattennivån höjs i dammens nedströmsdel. Eftersom en viss del av vattnet ansamlas i jordmaterialet då ofyllda porer fylls uppkommer en fördröjning vid mätning. Detta oavsett om mätning görs av tryck, läckage, temperatur etc. Vid simuleringen kunde denna fördröjning uppskattas.

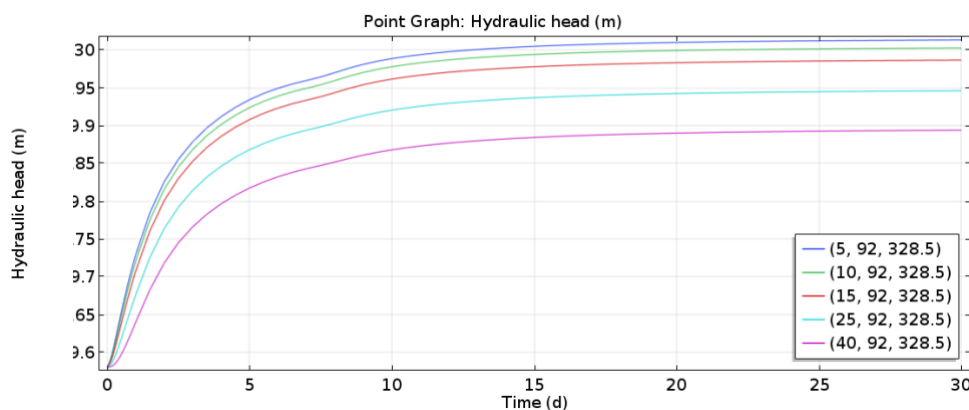
Läckageflödet i dränaget beräknades över ett tvärsnitt av modellen. Som framgår av Figur 4-6 tar det ca 10 dygn innan den större delen av läckageökningen registreras men att en svag ökning som stabiliseras efter ca fem dygn, ses redan under första dygnet. Om man vid analys av mätdata skulle notera en sådan ökning

behöver det inte tolkas som att läckaget ökar under denna period. Det kan vara en effekt av den magasinering i jordmaterialet av vatten som uppkommer i dammens nedströmsdel. Modelleringens viktigaste resultat här är dock att den största delen av läckageökningen inte fångas av dränageledningen utan strömmar förbi den och därmed inte mäts. I detta fall visar läckagemätningen endast en ökning med ca 0,5 l/s, vilket ska jämföras med de 3 l/s som strömmar genom skadan i tät kärnan. Detta överensstämmer väl med vad som konstaterats i många fall, där det framkommit att vatten passerar under dränagesystemet och därför inte mäts. Kontroll av dränages funktion och förståelse för hur stor andel som inte mäts är därför av stor vikt för att kunna utföra korrekt tolkning av uppmätt läckage.



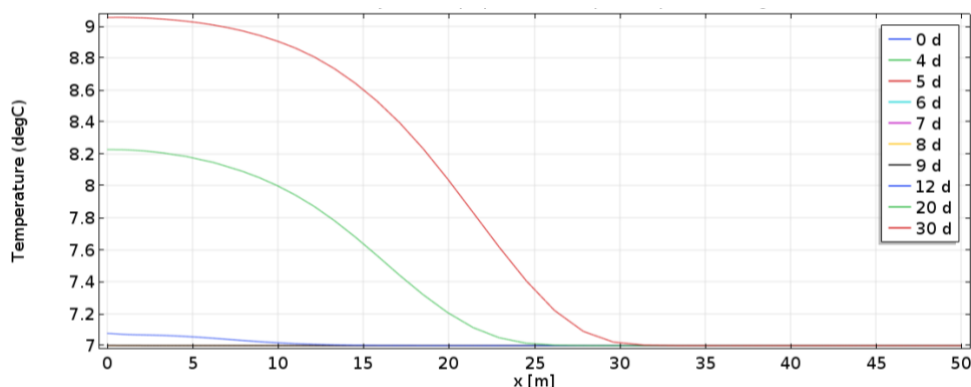
Figur 4-6 Flödesökning vid plötslig skada vid $t=0$ över uppströmsranden, uppsamlat i dränaget, samt ej uppsamlat och utströmmat i undergrund och naturlig mark.

Beräknat tryck i dammtån uppvisar ett liknande förlopp i tid (Figur 4-7). Även här pågår tryckökningen under ca 10 dygn innan stabilisering sker på en högre nivå. Intressant är också att i det grovkorniga material som normalt finns i fyllningsdammars stödfyllning kan en tryckökning som kan upptäckas på betydande avstånd från en skada. I detta fall ses en tydlig förändring på ca 40 m avstånd från skadan. Detta innebär goda möjligheter att upptäcka att förändring i tät kärnan skett, men med sämre förutsättningar att förstå var förändringen inträffat. I detta avseende hade mätning i dammens nedströmsfilter gett bättre möjlighet att bestämma skadans läge, men då krävs en tätare placering av mätrör jämfört med i stödfyllningen.



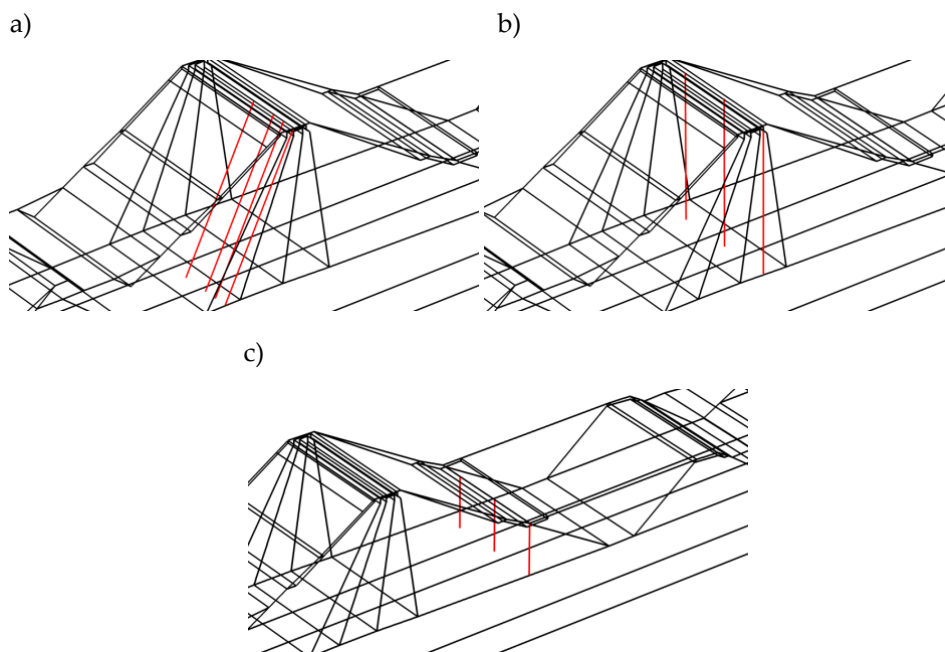
Figur 4-7 Tryckökning i några punkter på 5, 10, 15, 25 och 40 m avstånd från en skada, vilken inträffar vid $t=0$.

Med simuleringar kan även resultat för mätning utmed horisontella eller vertikala linjer tas fram. För detta simuleringsfall har därför temperaturen beräknats utmed en linje belägen parallellt med dammtån, något uppströms dränageledningen (Figur 4-5a). Detta motsvarar generellt ett lämpligt läge för en optisk kabel för temperatur-mätning. Av temperatursimuleringen framkommer tydligt var centrum för utströmningen sker, men detta först efter ca 15 dygn (Figur 4-8). Temperatur-responsen är alltså något senare än motsvarande med tryck- respektive flödes-mätning. Figuren visar även att tydlig temperaturavvikelse ($>1^{\circ}\text{C}$) ses efter ca 20 dygn på ca 10 m avstånd från skadan. Efter ytterligare 10 dygn ses temperatur-avvikelsen på nästan 20 m avstånd från skadan.



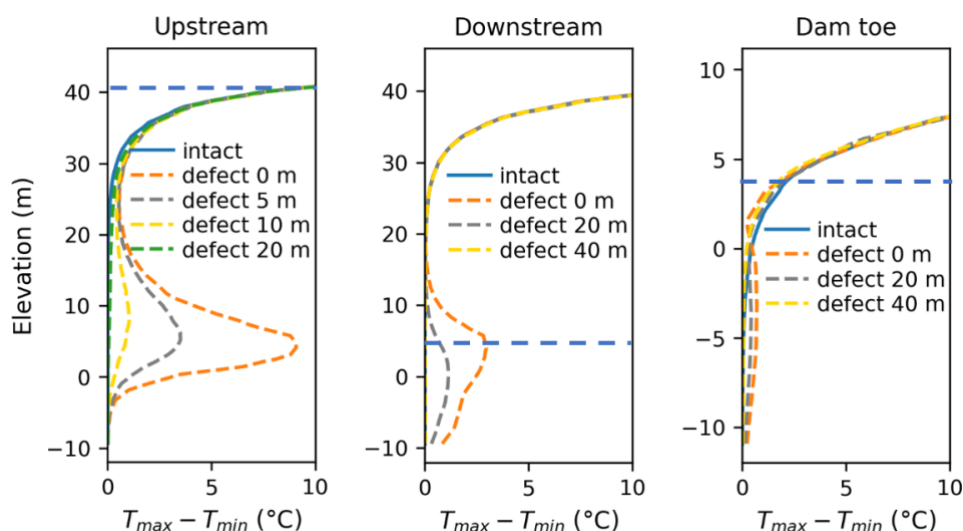
Figur 4-8 Beräknad temperatur längs dammen vid några tidpunkter efter skadans uppkomst (vid $t=0$ d). Skadan är belägen i punkt 0 m (som även utgör läget för modellens symmetrilinje).

Liknande simuleringar har även utförts för temperatur i vertikala mätrör. Här användes samma simuleringsmodell som beskrevs ovan för tryckmätningen (Figur 4-5). I Figur 4-9 visas resultatet för tre olika lägen för mätrör avsedda för temperaturmätning längs vertikala mätlinjer placerade i uppströmsfilter, nedströmsfilter och dammtå.



Figur 4-9 Placering av mätrör i uppströmsfilter (a), nedströmsfilter (b) samt i dammtå (c).

Av resultatet i Figur 4.10 framgår att tydligast temperaturrespons (beräknad och redovisad som säsongsvariation, $(T_{\max} - T_{\min})$) fås som väntat vid mätning i uppströmsfiltret, även om responsen dämpas snabbt med avståndet från skadans centrum. Det motsatta förhållandet fås vid mätning i dammtån där responsen blir liten, med relativt liten skillnad i temperaturdifferens upp till ca 20 m. Beräknad temperaturvariation är dock liten i detta exempel och ställer högra krav på mätnoggrannheten för att upptäckas. Mätning i nedströmsfiltret visar dock på tydliga mätbara förändringar på avstånd uppemot ca 20 m från skadans centrum. Detta talar för att mätningar i nedströmsfiltret vore ett lämpligt första alternativ för övervakning i detta fall.



Figur 4-10 Beräknad säsongsvariation av temperatur för tre olika lägen i vertikala mätrör (uppströmsfilter, nedströmsfilter samt dammtån) på olika avstånd från skadans centrum. Grundvattenytans läge visas med blåstreckad linje. Notera att figuren för dammtån har avvikande vertikalskala.

Analysmetodiken baseras i detta fall på mätning över en säsong, dvs. snabba förlopp kan inte upptäckas. Metodiken har dock en låg detektionsgräns, vilket medför att tidiga förändringar kan upptäckas.

4.1.4 Diskussion

De visade simuleringsexemplen illustrerar hur både punktmätningar och linjemätningar av tryck och temperatur kan användas för att detektera skador. Som framkommit kan båda "angreppssätten" ge värdefull information oavsett vilken mätparameter som önskas. Bäst utvärdering och tolkning görs vid kontinuerliga mätningar där jämförelser kan göras med föregående mätningar. Jämförelse kan i vissa fall även göras med intilliggande mätrör med liknande placering. I sådana fall kan kanske en rad av punkter liknas vid en kontinuerlig mätning längs en linje.

Vid tolkning av mätresultat från långtidsmätningar måste noggrant beaktande av den säsongsvariation som kan förekomma såsom magasinsnivå, nederbörd, luft- och vattentemperatur etc. göras.

Exemplen ovan visar vilken information som kan fås för en dammanläggning. Detta kan tas ett steg längre genom att skapa en "digital tvilling", i vilken all känd

grundinformation samlas liksom aktuella mätvärden. Med detta som grund kan tvillingens egenskaper analyseras genom exempelvis simulering, utvärdering med AI och pedagogisk presentation/redovisning. Allt för att underlätta förståelse för att upprätthålla en hög dammsäkerhetsnivå.

4.2 BETONGDAMMAR OCH BETONGKONSTRUKTIONER

Mätning i betongdammar och andra anslutande betongkonstruktioner (som utskov, monoliter, pelare och intagsbyggnader) görs ofta för att upptäcka förändringar avseende dränagesfunktion, injekteringsstatus, upptryck, sprickbildning, rörelser, differentialsättningar, m.m. Detta beskrivs närmare av Malm, Enzell, & Mohlin, 2019 där en översikt ges över olika instrument och metoder för övervakning av betongdammar och belyser deras användningsområde, fördelar och utmaningar samt hur de implementeras i Sverige.

Lösa zoner av tät kärnan i anslutning mot betongkonstruktioner är vanligt förekommande i svenska fyllningsdammar (Lagerlund & Nilsson, 2020). Detta beror ofta på svårigheter att packa tätjordsmaterialet tillräckligt i närheten av betongkonstruktionen eller intill den spont som ofta dragits in till betongpelaren. I många fall har dammens anslutning lägsta krönhöjd mot betongkonstruktioner varför överströmning först kommer att ske där. Dessutom är fyllningsdammen smalare i detta område för att ansluta mot betongen, vilket praktiskt medfört att samtliga material har utförts med mindre bredd än för dammen i övrigt.

Grundläggande mätparametrar är här desamma som för fyllningsdammar, dvs. vattenläckage, trycknivå och rörelser. De känsligaste områdena är upptryck under dammen (nedsatt dränageskapacitet) samt anslutning mellan jord och betong, eller mellan olika betongkonstruktioner och undergrunden.

I detta fall är det lättare att bedöma var svagheter finns, varför det även är enklare att bestämma var mätningen bäst ska utföras. Dessvärre kan det vara problematiskt att utföra installationerna utan att riskera att den eventuella svagheten förvärras. I sådana lägen måste därför nyttan av ett mätvärde vägas mot de problem som mätinstallationen i sig kan medföra.

4.3 UNDERGRUND OCH ANSLUTNINGAR

Undergrunden utgör i de flesta fall den del av dammkonstruktionen där kunskapsnivån är lägst. Baserat på geologiska undersökning har vanligen borrhningar med provtagning utförts av jord och berg, i varierande omfattning. Olika geofysiska undersökningar kan också ha utförts. Tillsammans har därmed en förståelse byggts upp av undergrundens egenskaper. Att betydande avvikelser kan förekomma är dock rimligt att anta. Dess betydelse kan dock vara olika om det handlar om en betong- eller fyllningsdamm.

Till detta kan läggas de åtgärder som utfördes då dammen byggdes, exempelvis injekteringsridåer i jord eller berg, materialval mot undergrund (tätjordsmatta/panur eller filter), samt teknisk utformning.

Bland förekommande problem med undergrunden kan nämnas:

- Urlakning av injekteringsskärmar.
- Reparationer/förstärkningar i jord eller berg.
- Sättningar och differentialsättningar.
- Grundläggning på bottenmorän med underliggande berg av okänd beskaffenhet.
- Inre erosion i jord och fyllda bergsprickor.
- Permeabla lager i undergrunden (och rösberg).

Även i detta fall utgör de grundläggande mätparametrarna (vattenströmning/läckage, trycknivå, och rörelser) en bra bas. Kemisk analys av läckagevattnet kan ge information om eventuell urlakning av injekteringsskärmar.

Turbiditetsmätning kan ge information om förekomst av inre erosion genom mätning av finmaterialhalten i läckagevattnet. Även geofysiska mätningar kan vara ett komplement för att få en översiktlig bild av materialförändringar, genom indirekt mätning av porositet och vattenhalt.

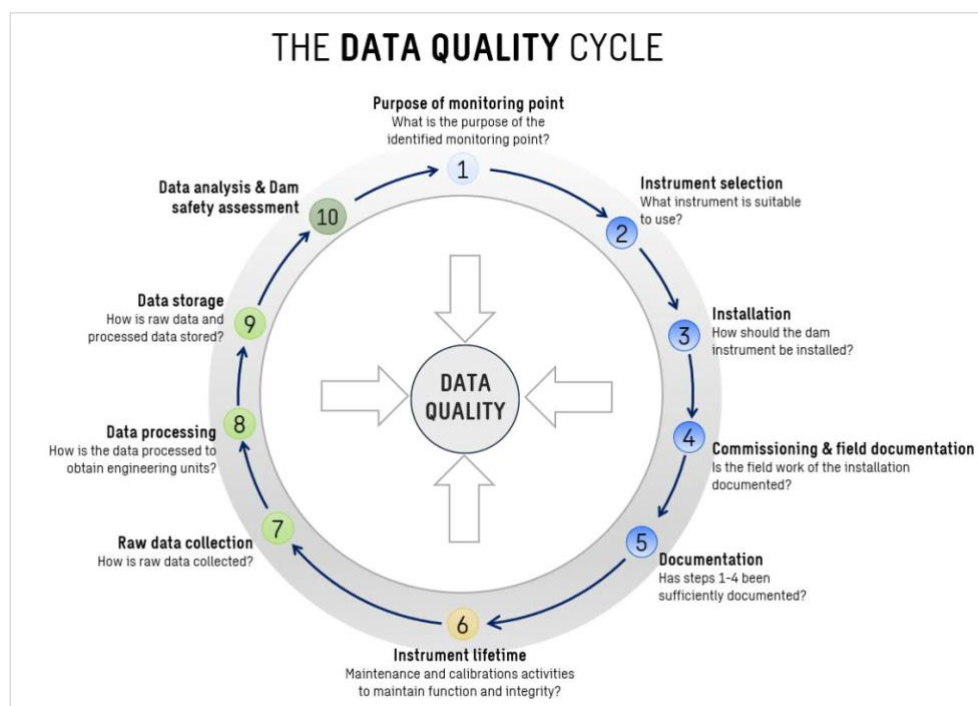
Temperaturmätning i borrhål kan ge värdefull information på grund av dess höga noggrannhet och upplösning. Därigenom kan man följa en eventuell ökning av vattenströmningen vid försämrade injekteringsfunktion eller inre erosion i undergrunden.

5 Datakvalitetscykeln

I ett dammsäkerhetsprogram används mätdata från instrumentering för att bedöma dammars tillstånd, funktion och säkerhet (se kapitel 2). Mätdata används även för att informera om dammsäkerhetsbeslut samt för att övervaka och kontrollera dammars beteende.

Med denna användning av mätdata blir det tydligt att kvaliteten på dessa data är en väsentlig aspekt av dammsäkerhetsarbetet, eftersom den påverkar noggrannhet och tillförlitlighet i funktions- och säkerhetsbedömningar av dammar. För att säkerställa att mätdata håller hög kvalitet och är tillförlitlig är det viktigt att utformning, installation och underhåll av instrumenteringssystem följer en systematisk process och hanteras regelbundet.

Ett koncept som beskriver denna process är Datakvalitetscykeln, illustrerad i Figur 5-1 (Ljunggren, Logan, & Fløystad, 2023). Den beskriver hur kvaliteten av mätdata är ett resultat av en korrekt och dokumenterad design och hur varje steg i den systematiska instrumenteringsprocessen påverkar datakvaliteten.



Figur 5-1 Datakvalitetscykeln, eng. Data Quality Cycle (Ljunggren, Logan, & Fløystad, 2023), beskriver att ett fel i något av de tio ingående stegen, som bör beaktas vid installation av ett damminstrument, kan äventyra kvaliteten på slutlig mätdata som används för bedömning av dammsäkerheten.

Datakvalitetscykeln beskriver en metodik i tio steg för instrumenteringsdata som följer en typisk arbetsprocess enligt följande:

1. Behov och syfte av mätning (mätpunkt).
2. Val av instrument.
3. Installation.

4. Driftsättning och fältdokumentation.
5. Dokumentation.
6. Drift och underhåll (skötsel).
7. Mätning (insamling av rådata).
8. Databearbetning.
9. Lagring av data (databas).
10. Analys av mätdata och dammsäkerhetsbedömning.

Varje steg i Datakvalitetscykeln kan påverkas av fel, vilket i sin tur kan påverka den slutliga datakvaliteten och därmed bedömningen av dammens funktion och säkerhet.

I de följande avsnitten beskrivs översiktligt Datakvalitetscykeln steg för steg, tillämpat för en damm. Typiska uppgifter och faktorer som kan påverka datakvaliteten i varje steg diskuteras. Genom att förstå hur datakvaliteten kan påverkas i varje steg, kan ingenjörer, dammägare och andra organisationer säkerställa att den data som används är av hög kvalitet och tillförlitlig.

Datakvalitetscykeln avser i denna tillämpning instrumentering av dammars funktion, men principerna kan även vara tillämplbara för andra instrumenteringsändamål inom vattenkraft- och gruvområdet. Detta inkluderar exempelvis instrumentering av utskovsluckors lägen, meteorologiska mätinstrument, inbrotts- och brandlarm, skyddsfunktioner samt data från övervakning och tillståndskontroll insamlad vid visuella kontroller, särskilda mätningar och geotekniska undersökningar.

Designprocessen av instrumenteringssystem innehåller många detaljer som var för sig är viktiga för att erhålla korrekta och effektiva mätningar. Exempel på sådana detaljer är installationsmetoden för specifika instrument och valet av sensorer för olika användningsområden. Den här rapporten går inte in på denna detaljnivå, men hänvisar till referenser som behandlar detaljfrågor.

Målet med Datakvalitetscykeln är att säkerställa att nya eller modifierade instrument ger tillförlitlig och robust data som uppfyller syftet vid design och kan integreras i dammägarens övergripande säkerhetsprogram.

Datakvalitetscykeln kan användas som en systematisk checklista för att stödja och vägleda i processen för design av mätpunkt och instrument, med huvudsyftet att erhålla pålitliga data utan problem med datakvaliteten. Datakvalitetscykeln ger även en förståelse för vilka erfarenheter och vilken expertis som krävs för installation av instrument, vilket kan variera beroende på komplexiteten.

5.1 BEHOV OCH SYFTE AV MÄTNING – STEG 1

Det första steget i Datakvalitetscykeln, se Figur 5-1, är att beskriva och dokumentera behovet och syftet med mätningen. Detta är ett nyckelsteg i en instrumenteringsplanering eftersom det påverkar valen i de efterföljande stegen.

Förändringar i en dammkropp eller undergrund kan ta tid innan de blir synliga på markytan och kan observeras visuellt. Därför behövs ofta mätinstrument i dammar. Syftet med dessa mätningar är vanligtvis att:

- Övervaka en mätparameter för att kunna detektera förändringar i mätdata eller i trender och således även dammens funktion.
- Undersöka och utvärdera dammens funktion och beteende, i vissa fall mot ett förväntat utvärderat/beräknat beteende.
- Genomföra riskhanteringsåtgärder från felmods- och riskanalys, där övervakning behövs för att hantera potentiella felmoder (se avsnitt 3.3).

Regelverk, riktlinjer och vägledningar för dammsäkerhet ställer ofta krav på instrumentering av dammar. I Sverige ges vägledning för instrumentering i RIDAS 2022. Exempelvis anges följande i huvuddokumentet:

"Dammanläggningen instrumenteras med beaktande av tänkbara driftfall, felmoder och dammsäkerhetsklass. Mätprogram och lämpliga intervall för utvärdering specificeras i samband med konstruktion och utformning. För dämmande delar kan instrumenteringen exempelvis omfatta mätning av läckage, portryck, upptryck och rörelse. För avbördningsanordningar kan instrumenteringen omfatta exempelvis mätning av luckläge, motorströmmar och temperatur."

Historiskt har kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS, sedan första utgåvan 1997, innehållit en tabell som anger "basinstrumentering" av fyllningsdammar beroende på dammsäkerhetsklass. Tabellen har använts flitigt som referens vid bedömningar av fyllningsdammars instrumenteringsbehov, såsom vid besiktnings, inspektioner, fördjupade dammsäkerhetsutvärderingar och vid instrumenteringsprojekt.

Tabellen finns kvar än idag i RIDAS TV9 Fyllningsdammar (2020) med snarligt innehåll som den första versionen förutom att konsekvensklassningsbenämningarna ändrats. Dagens synsätt i RIDAS, inklusive TV9 Fyllningsdammar, innebär att mätpunkter och instrumentering bestäms utifrån dammens verkliga övervakningsbehov, till exempel baserat på relevanta felmoder, kända svagheter eller informationsbehov om dammens funktion.

För att säkerställa varje steg i Datakvalitetscykeln och slutlig mätdatakvalitet är ett tydligt syfte med planerade mätpunkter avgörande. Syftet bör dokumenteras och besvaras bland annat följande frågor:

- Vad är det som ska övervakas och varför?
- Vilka parametrar ska övervakas och hur ofta?
- Hur länge ska övervakningen pågå och vilken fas av dammens livstid täcks?

- Vad förväntas mätvärdena och förändringarna vara under övervakningsperioden?

För att kunna svara på ovanstående frågor och beskriva mätpunktens syfte krävs det kunskap och information om dammanläggningen, inklusive platsspecifik information, samt förståelse för potentiella och faktiska felmoder.

Planering av en ny mätpunkt bör ske tidigt i ett instrumenteringsprojekt. Detta möjliggör för projektmedlemmar och andra intressenter att reflektera över syftet och vid behov justera såväl instrumenteringens omfattning och lokalisering som att uppdatera syftet. Ett otydligt eller bristfälligt dokumenterat syfte kan leda till sekundära fel i efterföljande steg av Datakvalitetscykeln och därmed påverka datakvaliteten negativt.

Även för befintlig damminstrumentering är det viktigt att syftet dokumenteras, så att det beaktas vid tolkning av mätdata. Om ett dokumenterat syfte saknas, bör det upprättas baserat på tillgänglig information, såsom förstudierapporter, installationsrapporter eller annan relevant dokumentation. Utan ett klart definierat syfte kan det uppstå osäkerhet kring datakvaliteten och hur data ska användas för att tolka och utvärdera dammens beteende. Författarnas erfarenheter är att äldre instrumenteringspunkter ofta saknar ett dokumenterat syfte.

5.2 VAL AV INSTRUMENT - STEG 2

När syftet med instrumenteringen har beskrivits är nästa steg i Datakvalitetscykeln att välja lämplig instrumentering för att samla in mätdata (se Steg 2 i Figur 5-1).

Det finns många aspekter att ta hänsyn till vid valet av instrument, vilket påverkar flera senare steg i Datakvalitetscykeln. Redan i detta tidiga skede finns det fallgropar som kan påverka den slutliga datakvaliteten. Några nyckelfaktorer att beakta vid val av instrument är:

- Övervakningens syfte.
- Lokalisering i dammen, undergrunden eller anslutningar.
- Installations- och platsförhållanden.
- Omfång och variabilitet av den parameter som ska övervakas.
- Svarstid.
- Manuell eller automatisk mätning och datainsamling.
- Behov av temperatur- eller barometrisk kompensation.
- Erforderlig livslängd.
- Underhållsbehov, tillförlitlighet och behov av kalibreringskontroll. Förnyelse.
- Miljö-, klimat- och mekaniska förhållanden som instrumentet kommer att utsättas för.

Detta avsnitt fokuserar främst på damminstrumentering, men även visuella observationer spelar en viktig roll i datainsamlingen för dammsäkerhet. Ett separat avsnitt om visuell övervakning finns längre ned.

5.2.1 Typer av mätningar

Typiska mätparametrar som används vid mätning av en damms beteende är:

- Läckageflöde.
- Grundvattennivå i vattenståndsrör.
- Porttryck.
- Rörelser (vertikal och horisontal).
- Temperatur.

Det finns många olika typer av instrument och sensorer som används för att övervaka dessa mätparametrar i dammar. De Melo & Conkle, 2024 har sammanställt en lista över de mest använda instrumenten/ sensorerna för övervakning av dammar. Det ges en kort beskrivning av instrumenteringen, hur den fungerar och var den lämpligen används, tillsammans med en schematisk illustration och ett fotografi av instrumentet. Även en omfattande lista med webbplatser till instrumenteringsleverantörer presenteras.

Flera Energiforskrapporter har upprättats inom området instrumentering och övervakning. NVE har även publicerat en relevant rapport. Dessa rapporter är:

- **Energiforskrapport 2022:861 - Mätmetoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar [2022]** (Reschetiuk, o.a., 2022)
- **Energiforskrapport 2019:596 – Kartläggning av instrumenteringssystem för betongdammar [2019]** (Malm, Enzell, & Mohlin, 2019)
- **Energiforskrapport 2019:577 – Erfarenheter av damminstrumentering [2019]** (Mohlin & Åström, 2019).
- **NVE Ekstern rapport nr. 15/2024 – Poretrycksmålinger på dammer 2024** (NVE, Løkke, A., 2024).

I Tabell 5-1 presenteras en sammanställning av typiska instrument som används på dammar samt de parametrar som mäts. För mer utförlig information om dessa instrumenteringsmetoder, inklusive deras för- och nackdelar, funktioner och användningsområden inklusive vilka instrument som typiskt används för olika felmoder samt ytterligare instrumenteringsmetoder som medtagits i tabellen nedan, hänvisas till referenserna ovan. De flesta instrumenttyperna kan avläsas både manuellt och automatiskt eller delvis automatiskt.

Tabell 5-1 Sammanställning av typiska instrument som används på dammar samt parametrarna de mäter (Reschetiuk, o.a., 2022), (Malm, Enzell, & Mohlin, 2019), (Mohlin & Åström, 2019).

Typ av mätning	Mätmetod/ Instrumentering	Hur det fungerar
Läckagemätning	Läckageuppsamling med överfall eller flödesmätare	Läckagevatten samlas upp i ett dränage och leds till en anordning som möjliggör bestämning av läckageflöde. Ett vanligt utförande är ett Thomsonöverfall, som består av en mätplåt med en 90° öppning.

Turbiditetsmätning (grumlighetsmätning)	Turbiditetssensor	En sensor placeras i läckageuppsamlingspunkt och mäter turbiditeten.
Vattenståndsmätning	Vattenståndsrör	Bestämning av vattennivå i vattenståndsrör. Det finns olika typer, från en enkel mätbrunn till vattenståndsrör med filterpets. Vattentrycket i rören kan mätas manuellt eller automatiskt med tryckgivare.
Porttrycksmätning	Porttrycksgivare	Porttrycket mäts i jord och berg. De vanligaste mätanordningarna är membranbaserade tryckgivare som antingen installeras direkt i marken med en signalkabel till avläsningspunkten eller installeras på en porttryckspets genom ett vattenståndsrör. Även slutna (vattentäta) hydrauliska system (slangar eller rör) förekommer.
Vertikal rörelseövervakning på dammens yta	Avvägning	Mätning av mätubbars nivå (höjd).
Horisontell och vertikal rörelseövervakning på dammens yta	Totalstation	Mätning av horisontell och vertikal position med hjälp av prismor.
	GNSS (statisk)	Satellitbaserad mätning av horisontell och vertikal position.
	GNSS (RTK-läge)	Real Time Kinematic (RTK) mätning är en teknik med ökad noggrannhet i realtid baserad på korrektionsdata.
	Automatiserad övervakning med integrerade system	Kombination av olika mätinstrument och sensorer för automatisk och kontinuerlig övervakning.
Ytbaserad rörelseövervakning (ovanför vattenytan)	Terrester laserskanning	Laserskanning från fast position.
	Fotogrammetri och laserskanning	Flygburen fotogrammetri och laserskanning.
	Satellitbaserade mätmetoder	Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) baserad på satellitdata.
	Markbaserad radarmätning	Markbaserad Synthetic Aperture Radar (SAR).
Rörelsemätning i dammkroppen/undergrunden	Inklinometer	Mätning av lutningsförändringar i vertikalt installerade rör.
	Sättningsmätare	Mätning av vertikala sättningar.
	Extensometer	Mätning av förändringar i längd.

	Töjningsmätare	Mätning av töjning och förskjutningar.
	Fiberoptiska sensorer	Mätning av töjning längs med fiberoptiska kablar.
	Sprickgivare	Mätning av sprickbredd.
	ShapeArray (SAA)	Mätning av rörelser med hjälp av en kedja av sensorer.
Rotation/deformation av betongdamm/undergrund	Tiltgivare	Mätning av lutning av en konstruktionsdel.
	Hängande pendel	Tyngd fäst i en lina förankrad högt upp i betongdamm. Mätning av horisontella rörelser.
	Inverterad pendel	Tyngd fäst i en lina förankrad i dammens grund som hålls spänd med ett flöte i en tank med viskös vätska högt upp i dammen. Mätning av horisontella rörelser.
Temperaturmätning	Temperatursensor	Temperaturen mäts i enstaka punkt eller i temperaturlinor i exempelvis vattenståndsrör.
Temperaturmätning i fiberkabel	Fiberoptisk temperaturkabel	Temperaturen mäts längs en fiberoptisk kabel som exempelvis installeras nedgrävd i dammtån.

Andra mätningar

Det finns ett antal mätningar som inte utförs direkt i dammar för att fånga dess beteende, men som påverkar förhållandena och ger värdefull information vid analys. Exempel på sådana är:

- **Klimatmätningar**

Relevant klimatdata såsom nederbörd, temperatur och lufttryck mäts ofta i en väderstation vid dammanläggningen. Andra viktiga klimatdata är exempelvis snödjup, markfuktighet och tjäle som input till bedömning av vårfloden, vilka mäts inom avrinningsområdet, samt lufttemperatur och vindhastighet.

- **Vattennivåmätning**

Vattennivåmätning, som magasin- eller nedströms vattennivå, mäts med olika typer av givare. Även manuella avläsningspeglar är vanliga.

- **Seismisk mätning**

Seismisk mätning utförs med mätanordningar såsom exempelvis seismograf, accelerograf eller accelerometer, vilka mäter markrörelser i området på och omkring dammen. Därigenom kan man avgöra vilken påverkan en seismisk last har haft på rörelserna av dammkroppen. Seismisk övervakning utförs normalt inte på dammar i Sverige, men

övervakning av seismiska rörelser kan vara ett sätt att övervaka och hantera en potentiell felmod eller dammsäkerhetsrisk initierad av en seismisk last. Mer information om seismisk övervakning av dammar finns i internationell litteratur, exempelvis (ICOLD, 2018) och (De Melo & Conkle, 2024).

- **Övriga mätningar**

Andra anläggningsspecifika mätningar är exempelvis mätning av flöden i inkommande vattendrag till magasinet eller inom avrinningsområden med mera.

5.2.2 Visuell övervakning

Visuell övervakning är en av de mest centrala delarna i ett dammsäkerhetsprogram och bra planerade och utförda visuella inspektioner, utförda av damminspektörer/tillsynspersonal, kan ge viktig information om oväntad eller förändrad dammfunktion.

Visuella inspektioner bör utformas för att så tidigt som möjligt notera typiska indikationer på förändrat beteende av dammen eller potentiella felmoder. Potentiella felmoder kan vanligtvis inte observeras på markytan förrän de har fortskridit en bit i händelsekedjan. Damminspektörer bör utbildas och tränas på vilka typiska indikationer av förändrat beteende som kan upptäckas med visuella observationer.

Visuella inspektioner bör dokumenteras för att säkerställa spårbarhet av såväl normalt beteende som eventuella förändringar. Standardiserade checklistor med möjlighet till kommentarer och foton, inklusive datum, tid, väder och observatör, är ett bra sätt att strukturera och dokumentera visuella observationer.

Med den ökade tillgången på högkvalitativa kameror och goda kommunikationsmöjligheter kan visuell övervakning genom platsbesök kompletteras med övervakning via fjärrkameror eller drönare som dokumentation. Dessa verktyg är speciellt användbara för att hålla kontroll på områden med kända eller potentiella problem och för att följa om förändring sker med tiden.

5.3 INSTALLATION – STEG 3

När syftet har definierats och instrumenttypen valts är nästa steg ”installation av instrumentet” (Steg 3 i Datakvalitetscykeln i Figur 5-1).

Vid installation av nya instrument är det viktigt att säkerställa att de inte äventyrar dammsäkerheten eller skadar befintliga instrument och andra anläggningsdelar. Dessa faktum är viktiga, men diskuteras inte vidare i detta avsnitt.

Komplexiteten vid installation av instrument varierar beroende på val av instrument och syftet med mätningen. Även övergången från tidigare manuell datainsamling till nu mer vanliga automatiska datainsamlingssystem (ADAS¹) för

¹ Automatic data acquisition systems

att läsa, lagra och överföra mätdata, tillför även mer komplexitet till installationsprocessen.

Installationsprocessen involverar många faktorer där designfel kan leda till kvalitetsproblem med mätdata. Följande är några viktiga faktorer att beakta vid instrumentdesign och installation:

- Överensstämmelse med övervakningens syfte.
- Specifikationer och manualer för instrumentinstallation.
- Damm- eller grundförhållanden, speciellt de som kräver särskild uppmärksamhet.
- Borr- och injekteringsmetoder (om de behövs).
- Övervakning av entreprenörer av personal med rätt erfarenhet inom damminstrumentering.
- Skydd av instrument mot vandalisering och miljöförhållanden som kan påverka data eller instrumentets livslängd (t.ex. regn, översvämningar, vind, sol, frysning, snö och blixtnedslag).
- Tillgång och metoder för kalibreringskontroll.
- Förutsättningar för redundans och ersättning (instrument, kablar, loggers etc.).
- Lämpliga automatiska system för datainsamling (ADAS) för dammanläggningen (dataloggers, gateways, telemetri, strömförsörjning, nätverksåtkomst etc.).
- Överensstämmelse mellan givare och övervakningssystem.

5.4 DRIFTSTÄTTNING OCH FÄLTDOKUMENTATION – STEG 4

Steg 4 i Datakvalitetscykeln omfattar driftsättning av nya instrument och fältdokumentation. En väldokumenterad installation är grundläggande, då den är nödvändig för de efterföljande stegen i Datakvalitetscykeln, till exempel att bearbeta rådata till enheter som används vid mätdataanalys.

Felaktig, otillräcklig eller avsaknad av dokumentation från projekt till förvaltning kan leda till betydande brister i databehandlingen och datakvaliteten, och följaktligen till en förlust av förtroendet för instrumentet och dess mätdata.

Personal som är involverad i instrumenteringsprojektering och installation behöver klargöra vilken information som kommer att krävas i framtiden för att förstå de faktorer som påverkar instrumentets prestanda, underhållsbehov, databehandling och livslängd. Exempel på information som kan krävas från installationen är:

- Dokumentation och ritningar (relationshandlingar) av instrumentinstallationen. Viktigt att relevanta uppgifter dokumenteras.
- Dokumentation och ritningar (relationshandlingar) av automatiska datainsamlingssystem (ADAS).
- Data från driftsättningsmätningar.
- Observationer och foton från installationen.

- Nollavläsningar, kalibreringsfaktorer och kalibreringscertifikat.
- Underhållskrav.
- Instrumentmärkning.

Entreprenören som genomför installationen spelar en nyckelroll i att tillhandahålla dokumentation. Erfarenheten bland entreprenörer inom installation av instrumentering vid dammar kan variera. Därför är det viktigt att tydligt beskriva och kommunicera kraven på installations- och fältdokumentation till entreprenören innan installationen påbörjas.

Ett uppstartsmöte med installationsentreprenören bör hållas i ett tidigt skede. Detta ger möjlighet att förklara instrumentens allmänna syfte, deras säkerhetskontext för dammen och betydelsen av noggrann installation och efterlevnad av specifikationer och installationsbeskrivningar.

Under installationen är det också viktigt att regelbundet följa upp entreprenören för att säkerställa att installationen utförs enligt specifikationerna och att nödvändig installationsdata registreras. Det är normalt svårt att göra detta i efterhand när installationen har slutförts, eftersom viktig information redan kan ha gått förlorad eller av misstag utelämnats.

Även de som arbetar med kontrollanläggningen är viktiga att involvera. Fel eller misstolkningar kan uppstå när utrustning installeras och programmeras i en PLC (Programmable Logic Controller), till exempel hur signaler ska behandlas med filtrering och skalning. Kunskap om varför och hur man mäter i dammar är därmed även relevant för de som programmerar de automatiska insamlingssystemen.

5.5 DOKUMENTATION – STEG 5

Korrekt dokumentation av damminstrumentering är avgörande för att uppnå och säkerställa hög datakvalitet. Varje steg i Datakvalitetscykeln kräver specifik dokumentation. Steg 5 i Datakvalitetscykeln (Figur 5-1) syftar till att tydliggöra behovet av en komplett dokumentation, där all relevant information om mätpunkterna, instrumenteringen och mätningarna samlas.

Ett sätt att dokumentera detta är genom ett mätprogram eller övervakningsprogram. Detta beskrivs i bland annat RIDAS TV 9 Fyllningsdamm (2020) och i CEATI-rapporten (De Melo & Conkle, 2024). Det är värt att notera är att innebörden av ett mätprogram skiljer sig mellan dessa referenser. I RIDAS är ett mätprogram mer fokuserat på själva instrumenteringen (tillståndsovervakningen), medan det i CEATI-rapporten är kopplat till hela övervakningen av dammen.

Ett annat sätt att systematiskt sammanställa information över en dammanläggnings instrumentering är att upprätta ett instrumenteringsregister. I ett sådant register kan relevant information om instrumenteringspunkter föras in med hänvisningar till tidigare upprättad dokumentation.

RIDAS HD (2022)

RIDAS HD (2022) beskriver att de dämmande och avbördande funktionerna instrumenteras. Detta kallas tillståndsovervakning där dammanläggningens instrumentering utformas med hänsyn till aktuella felmoder, skick, utformning och dammsäkerhetsklass. Ett mätprogram ska specificeras i samband med konstruktion och utformning. RIDAS TV9 fyllningsdammar (2020), specificerar följande förslag på innehåll i ett mätprogram:

”För var mätpunkt ska minst följande finnas i mätprogram och vara dokumenterat som beskrivning av övervakningen och dess funktion:

- *Beskrivning av instrumenteringspunkten (typ, fabrikat, installation, nivå, etc.).*
- *Avsikten med instrumenteringspunkten (var i dammen instrumenteringspunkten är placerad, samt vilken felmod som övervakas).*
- *Förväntat intervall för mätdata, samt gränsvärden relevanta för dammens funktion.”*

CEATI-rapporten (De Melo & Conkle, 2024)

I rapporten beskrivs procedurer för att utveckla en plan för övervakning av dammsäkerheten, kallad ”Surveillance and Monitoring Plan”. Det framgår att omfattningen av denna övervakningsplan för en dammanläggning bör utarbetas med hänsyn till följande dokumentation om dammen:

Stödjande anläggningsinformation (Supporting Technical Information, STI)²

Sammanfattningsvis beskrivs att STI har som syfte att sammanfatta viktiga delar av ett projekt (dammanläggning) samt relaterad information i ett överskådligt dokument. Detta dokument ska innehålla all nödvändig information för att erhålla en full förståelse av dammen, inklusive de analyser och bedömningar som ligger till grund för säkerhetsbedömningar. STI-dokumentet ska betraktas som ett levande dokument som löpande uppdateras med ny information och analyser.

Potentiell felmodsanalys (PFMA)

En potentiell felmod (PFM) är en kedja av händelser som kan leda till dammhaveri och okontrollerad utströmning av magasinsinnehållet. En potentiell felmodsanalys (PFMA) breddar dammsäkerhetsutvärderingen genom att inkludera scenarier som tidigare kan ha förbisetts i ”standardbaserade” utredningar. En PFMA beaktar såväl initierande händelser och utveckling av felmoden som dess konsekvens. Det nämns att en uppdatering av felmoder behöver utföras när ny information blir tillgänglig eller när dammens tillstånd förändras.

² Motsvarar till stora delar en Anläggningsbeskrivning enligt RIDAS TV 2022.

Rapporten framhäver att en övervakningsplan lämpligen upprättas baserat på ovanstående två steg. Rapporten hänvisar till kapitel 5 (Model Surveillance, Monitoring, and Evaluation Program For Dam Safety) och kapitel 6 (Systematic Approach To Monitoring Programs) för vägledning att utveckla planen. Typiskt innehåll i en övervakningsplan och mätfrekvens för instrumentering av dammar presenteras uppdelade på konsekvensklass vid dammhaveri (låg, medel och hög). För denna information hänvisas till tidigare Energiforskrapport (Nilsson, 2014) som redovisar detta.

Avslutningsvis nämner rapporten att resultaten från övervakningen bör dokumenteras i en rapport som redovisar och utvärderar mätdata och bedömer dammens beteende i förhållande till förväntat beteende utifrån ursprunglig design och potentiella felmoder.

5.6 DRIFT OCH UNDERHÅLL – STEG 6

När ett nytt damminstrument har installerats, dokumentationen är slutförd och mätningarna har påbörjats, flyttas övervakningspunkten till Steg 6 i Datakvalitetscykeln, enligt vilket kallas instrumentets livslängd.

Den förväntade livslängden för ett instrument kan variera, från dagar till decennier, beroende på instrumentets typ, syfte och funktion. Det är viktigt att definiera den erforderliga livslängden för instrumentet redan i Steg 1 (syfte) av Datakvalitetscykeln så att instrumentdesign, urval och installationsrutiner tar hänsyn till den erforderliga livslängden från start.

Under instrumentets livslängd behövs drift och underhåll samt ofta verifierings- tester och kalibreringsaktiviteter för att upprätthålla instrumentets funktion och säkerställa noggrann mätning och tillförlitlig data. För mätöverfall kan till exempel miljöfaktorer som skräp, järnbakterieslam, korrosion, läckage, nederbörd och bakåtdämning påverka tillförlitligheten. Vid sådana fall måste underhållet anpassas.

Ersättning och förnyelse av instrumentering

Om ett instrument eller dess automatiska system för datainsamling skadas eller slutar att fungera som avsett, kan det bli aktuellt att ersätta eller förnya det. Vid sådana fall är det lämpligt att börja om från Steg 1 i Datakvalitetscykeln eftersom förutsättningarna för såväl instrumenteringsbehov som syfte liksom val av instrument och installationsmetod kan ha förändrats sedan det ursprungliga instrumentet installerades.

Avveckling av instrumentering

I vissa fall kan det även bli aktuellt att avveckla en mätpunkt helt och hållet. Detta kan även bero på faktorer såsom förändringar i projektets mål, ny teknik som gör den gamla mätpunkten obsolet, eller brist på relevanta data som samlas in. Innan beslut om att avveckla en mätpunkt fattas, är det viktigt att noggrant utvärdera dess betydelse och bidrag till det övergripande dammövervakningen. Det är viktigt att involvera relevanta intressenter i processen, för att säkerställa nyttan och att alla aspekter av datakvalitet och dammsäkerhet beaktas.

Vid avveckling av en mätpunkt är det viktigt att dokumentera och motivera när, varför och hur man avvecklar instrumenteringen, så att det kan refereras till i framtiden.

5.7 DATAINSAMLING – STEG 7

När instrumentering har installerats och dokumenterats vid dammanläggningen är nästa steg att utföra mätningar och samla in data (rådata), vilket beskrivs i Steg 7, i Datakvalitetscykeln, se Figur 5-1.

Såväl avläsning (mätning) av instrument, datainsamling och dataöverföring kan utföras antingen manuellt eller automatisk. Den huvudsakliga trenden under 2000-talet har varit att både mätning och dataöverföring snabbt har gått från manuella till automatiska metoder. Det finns olika fördelar och nackdelar med manuella respektive automatiska metoder. Mer information om dessa finns bland annat att läsa i tidigare nämnda referenser och i (Adamo, Al-Ansari, Sissakian, Laue, & Knutsson, 2020).

Gällande datakvalitet, är det för manuella mätningar viktigt att inspektören korrekt kan identifiera instrumentet och mätproceduren och utföra och registrera mätningen. Programmerbara elektroniska enheter för manuell datainsamling ger möjlighet till kvalitetskontroll under dessa aktiviteter.

Instrumenteringsdata som registreras automatiskt av en datalogger är mindre benägna att drabbas av vissa fel (förutsatt att loggerkonfigurationen är korrekt), men kvalitetsproblem kan uppstå och måste då bedömas.

5.8 DATABEARBETNING – STEG 8

Nästa steg i Datakvalitetscykeln är att bearbeta insamlad rådata och presentera dem i lämplig form för vidare användning vid analys och dammsäkerhetsbedömning.

I databehandlingssteget bearbetas insamlad rådata till fysikaliska storheter med olika formler. Exempelvis, används uppmätt vattennivå uppströms ett mätöverfall vid beräkning, med en formel, till ett flöde som används vid dokumentation och analyser.

Larmvärden

Larmvärden är användbara vid övervakning av dammar, eftersom de gör det möjligt att kontrollera och jämföra uppmätt (bearbetad) mätdata i förhållande till fördefinierade larmgränser. Larmgränser kan sättas för mätpunkter för att varna om ett avvikande mätvärde eller en avvikande trend jämfört med normala och/eller förväntade värden. För information om hur larmnivåer kan sättas och benämnas hänvisas bland annat till tidigare nämnd litteratur.

Avseende kvaliteten på mätdata är det viktigt att ha rutiner för dokumentation av larm som uppstår. Dokumentationen av larm bör åtminstone inkludera när larmet utlöstes, vem som hanterade det och en beskrivning av orsaken till att det utlöstes. Saknas det dokumentation kring uppkomna larm, kan det leda till framtida

problem med datatillförlitligheten. På samma sätt måste man dokumentera eventuella ändringar i larmgränser, inklusive tidigare använt och nytt larmvärde samt en motivering till justeringen.

Larm utlöses ofta av felaktiga avläsningar, antingen manuellt eller automatiskt, vilket i sin tur kan vara en indikation på brister i ett tidigare steg av Datakvalitetscykeln. För att effektivt kunna identifiera och sortera bort orimliga mätvärden, som inte överensstämmer med instrumenteringspunktens design, kan det vara värdefullt att inkludera så kallade "Data Check" larmgränser. Dessa gränser definierar de lägsta och högsta möjliga värdena för instrumentet. Exempelvis för ett grundvattenrör som mäts manuellt, skulle dessa gränser motsvara botten- och toppnivån av röret. Inom dessa nivåer måste vattennivå vara.

För vissa dammanläggningar kan det vara aktuellt med användning av dynamiska larmgränser som ett komplement till statiska larmgränser. Detta kan till exempel vara fallet för ett magasin med stor regleringsamplitud, där vattennivån i magasinet har betydande påverkar på storleken på olika mätparametrar för dammen.

Med utvecklade möjligheter inom datahantering och så kallad 'data-driven monitoring', där mätdata kontinuerligt kan samlas in och analyseras, har förbättrade möjligheter skapats för att upprätta modeller som beräknar och prognostiserar dynamiska larmvärden baserat på aktuella och förväntade förhållanden. Artificiell intelligens (AI) används alltmer inom dessa områden för att analysera data och förutsäga framtida beteende hos dammar.

5.9 LAGRING AV DATA – STEG 9

Det näst sista steget i Datakvalitetscykeln fokuserar på att spara mätdata för framtida analys, vilket ofta hanteras i en typ av databas, steg 9 i Figur 5.1.

En databas som innehåller både sparad rådata (faktiska mätdata) och bearbetad data är grundläggande ur ett datakvalitetsperspektiv. Rådata har stor betydelse för framtida utvärderingar, där den kan användas för analyser och justeringar och kontroll av data. Det är även viktigt att överväga att regelbundet, gärna dygnsvis, säkerhetskopiera databasen till en backup-server som är belägen på en annan plats, för att minska risken för att mätdata går förlorad vid till exempel ett serverhaveri.

5.10 ANALYS AV MÄTDATA OCH DAMMSÄKERHETSBEDÖMNING – STEG 10

Det näst sista steget i Datakvalitetscykeln fokuserar på att spara mätdata för framtida analys, vilket ofta hanteras i en typ av databas. I det sista steget används bearbetad mätdata för dataredovisning och dataanalys samt utvärdering och bedömning av dammsäkerheten (Figur 5-1, Steg 9 och Steg 10).

Mätdatasystem

Bearbetad data från instrumentering presenteras vanligtvis i grafer och diagram, vilket gör det möjligt att visualisera informationen samt utvärdera och identifiera avvikelser i både enskilda mätpunkter och i datatrender. Det finns många olika mätdatasystem som hanterar både databehandling och visualisering.

Ur ett datakvalitetsperspektiv är en central aspekt av dessa system möjligheten att granska de formler och konstanter som används för att omvandla och bearbeta mätdata, inklusive eventuella ändringar som kan ske över tid. Även säkerhetsåtgärder är grundläggande för att säkerställa datakvaliteten i ett övervakningssystem och i en databas. Detta inkluderar exempelvis användartillstånd för att hantera ändringar av beräkningsparametrar eller att redigera data och larmgränser, inklusive loggning av förändringar.

Analys och utvärdering av mätdata

Risken för kvalitetsfel under analysen av mätdata kan minimeras genom att utveckla verktyg och procedurer som uppfyller generella krav på analys av data, men som även är anpassade efter egenskaperna hos varje unik damm. Vanligtvis kräver dataanalys:

- Kunskap om dammens design, egenskaper och förväntat beteende, felmoder, nyckelprestandaparametrar och nuvarande säkerhetsstatus.
- Förståelse för miljömässiga (klimat) och driftmässiga parametrar som styr beteendet hos dammen och dess grundläggning.
- Kunskap om damminstrumentering och de faktorer som kan påverka mätdata.
- Förmåga att betrakta information och data i sammanhanget av dammen och övervakningssyftet med instrumenten.
- Granskning av data i form av tidsseriediagram, listor och rumsliga sektioner och planer, för att möjliggöra identifiering av trender och avvikande data eller beteenden.
- Granskning av kommentarer och annan information som tillhandahållits av inspektörer och insamlats vid tillståndskontroll.
- Granskning av eventuella larm, deras orsaker och uppföljning.
- Förståelse för eventuella underhållsrelaterade aktiviteter som har påverkat mätningar och mätdata.
- Uppmärksamhet på möjliga fel i tidigare steg av Datakvalitetscykeln som påverkar datakvaliteten.

I vissa fall måste den typiska metoden för dataanalys som beskrivs ovan modifieras eller kompletteras med en mer djupgående analys, till exempel för att förstå ovanliga egenskaper hos dammen och/eller undergrunden.

6 Slutsatser och rekommendationer

I denna rapport sammanfattas dagens bästa kunskap inom området övervakning av dammar med särskilt fokus på svenska förhållanden. Rapporten baseras på en litteraturgenomgång av internationella och svenska publikationer. En fundamental ambition med arbetet har varit att ge stöd för att höja nivån på analys och tolkning av mätdata. Som utgångspunkt för detta har ett antal utvalda typexempel för verkliga dammar presenterats där numeriska beräkningar använts för att öka förståelsen av ett antal mätparametrar. Detta för att öka förståelsen för vad exempelvis ett värde från mätning i en enskild mätpunkt representerar vid tolkning och beteende i en hel damm.

6.1 SLUTSATSER

Grundprincipen att inom dammsäkerhetsområdet använda "bästa möjliga teknik" och utföra ständiga förbättringar med stöd av beprövad och ny teknik borgar för en god säkerhetskultur. Att identifiera svagheter i tidigt skede och kontinuerligt följa utvecklingen av dessa är också centralt. Med god övervakning och löpande uppföljning kan åtgärder utformas innan större skador uppkommer eller att dammsäkerheten äventyras.

För att kunna utföra en bra utvärdering av mätdata krävs en god förståelse av mätteknikens grunder, vad mätvärdet representerar i sammanhanget (punkt, linje, yta eller volym), var mätningen sker, samt vilken inverkan mätningen har för dammens säkerhet. Brister i något av dessa steg kan medföra såväl överflödiga instrumentering som ökad risk för dammhaveri. Nyttan av en god övervakning med ett väl fungerande mätsystem ska därför inte underskattas.

Mätsystem kräver underhåll och skötsel, vilket är ett löpande arbete. Väl fungerande rutiner, kvalitetskontroll etc. är därför av stor betydelse för att uppnå hög kvalitet. I detta sammanhang ska lyftas vikten av en fungerande organisation med tydlig struktur och ansvarsfördelning samt kompetens inom området. Detta gäller inte minst utvärdering av mätningar som erfarenhetsmässigt inte alltid utförs i den utsträckning som behövs. Detta har dessvärre framkommit vid efteranalys av inträffade dammhaverier. Med den explosionsartade teknik- och IT-utvecklingen de senaste decennierna kan en sund generell hållning vara att mäta mindre och analysera och utvärdera mer.

Simuleringar av tryck, vattenströmning och temperatur har gjorts för några fyllningsdamm. Dessa visar dels exempel på vilken information som kan fås för en dammanläggning i befintligt skick, samt vilka förändringar som kan uppkomma vid skador i dammar. Resultatet från simuleringar kan användas som underlag vid tolkning av respons vid olika förutsättningar och mätresultat kan erhållas genom numeriska beräkningar, vilket blivit alltmer vanligt vid dammsäkerhetsanalyser.

Genom simuleringar kan man även fastställa varselnivåer/gränsvärden för olika parametrar i dammen för att underlätta operativ förståelse för dammätning samt nyttja resultat vid utvärdering och tolkning. Därigenom fås ett bra underlag för beslut. Ytterligare en möjlighet med modellering är att simulera skador och svagheter i dämmande funktion som t.ex. en del av tät kärnan med avvikande täthet, inre erosion genom "piping" eller sättning i dammkrönet, eller att studera effekter av en reparation etc.

Numeriska beräkningar, baserade på en modell som representerar dammens fysikaliska beteende väl, ger såväl vägledning om förväntade värden som goda möjligheter att variera olika materialparametrar och laster i känslighetsanalyser. Därigenom kan man bättre ringa in beteendet både lokalt och "globalt" vid bedömning av dammsäkerhet.

Vid mätning av betongdammar och anslutande betongkonstruktioner är det lättare att bedöma var svagheter finns än för fyllningsdammar. Det blir därför enklare att avgöra var mätningen bäst bör utföras. Det kan ibland vara problematiskt att utföra installationer utan att riskera att den eventuella svagheten förvärras. I sådana fall måste nyttan av en mätpunkt vägas mot de problem som installationen kan skapa.

Undergrunden utgör i de flesta fall den del av dammkonstruktionen där kunskapsnivån om dammanläggningen är lägst. Även i detta fall utgör de grundläggande mätparametrarna (vattenströmning, trycknivå, och rörelser) en bra bas för övervakning. Geofysiska mätningar kan vara ett komplement för att skapa en översiktlig bild av grunden. Temperaturmätningar i borrhål kan ge värdefull information på grund av hög noggrannhet och god upplösning. Därigenom kan man exempelvis följa en eventuell ökning av vattenströmning vid försämrad injekteringsfunktion eller vid inre erosion i undergrunden.

Ytterligare slutsatser är att ett övervakningsprogram "Dam Safety Monitoring Program" (med funktion av mätpunkt, infrastruktur och mätdatakvalitet) är ett koncept som beaktar all tillgänglig information för en dammanläggning, inte bara mätdata, för dammövervakning. Vidare att Datakvalitetscykeln beskriver en arbetsmetodik i tio steg som säkerställer hög kvalitet på instrumentering och mätdata.

6.2 REKOMMENDATIONER

Fortsatt utveckling krävs för att bibehålla och vidareutveckla hög dammsäkerhetsnivå. Branschen har visat att grundläggande rutiner och metoder finns, samt även ambitioner att utveckla vidare genom FoU-verksamhet. Ett gott exempel på sådan satsning är de projekt som utförts vid testdammen i Älvkarleby, vilket gett internationell uppmärksamhet.

Följande rekommendationer ges:

- Utför utvecklingsprojekt med utgångspunkt från numerisk modellering av några olika felmoder, med en systematisk analys av inverkan av parametrar som normalt mäts vid dammövervakning. Detta i syfte att öka förståelsen för vad ett typiskt mätinstrument faktiskt visar för mätvärden i

förhållande till ett antal olika skador i en damm och att använda beräkningsresultat för att förbättra dammsäkerhetsutvärderingar.

- Arbetssättet med ett kunskapsbaserat övervakningsprogram (Performance Monitoring Program) kan tas ett steg längre genom att skapa en "digital tvilling", i vilken all grundinformation samlas liksom resultat från dammätningar. Med detta som grund kan tvillingens egenskaper analyseras genom exempelvis simulering, utvärdering med AI och användas för pedagogisk redovisning. Genom den utveckling som sker inom området, kan ökad användning förväntas av denna metodik i framtiden. Detta förutsätter dock en grundläggande förståelse för dammens funktion, vilket kräver resurser, samt kompetent och engagerad personal.
- Utför utvecklingsprojekt med predikativa modeller som prognostiserar larmgränser utifrån yttre förhållanden (denna rekommendation hänger ihop med ovanstående). Många mätparametrar vid dammar påverkas av yttre faktorer, såsom snösmältning, nederbörd, stora variationer i magasinets regleringsamplitud, spillvattenföring, lufttryck, temperaturförändringar eller andra förändringar. För sådana anläggningar kan dynamiska larmvärden baserat på en prognosmodell vara ett sätt att sätta snävare larmgränser jämfört med statiska larmgränser som tar hänsyn till hela årsvariationen. Det har genomförts fallstudier inom Energiforsk för betongdammar vilka även kan utföras för fyllningsdammar.
- Säkerställ att god kunskap inom damminstrumentering upprätthålls inom branschen. Det är viktigt att kompetensen inom området upprätthålls, eller snarare ökar, i och med den snabba utvecklingen av instrument, automatiska mät- och datainsamlingssystem samt datadriven övervakning. Ett sätt att inhämta kunskap är att medverka vid instrumenteringsprojekt, såväl i projekteringsskedet som i fält för att förstå helheten om hur instrument, tillhörande delsystem i instrumenteringssystemet fungerar, installeras samt förvaltas och underhålls.

7 Referenser

- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*.
- Bergman, M., & Johansson, S. (2000). *Scientific workshop on internal erosion monitoring*. Elforskrapport 01:21, Elforsk, Stockholm.
- Bernstone, B., Lagerlund, J., Toromanovic, J., & Juhlin, C. (2021). *Deformationer och portryck i en experimentell fyllningsdamm. Mätningar under initiell dämningssupptägn*. Energiforskrapport 2021:772, Energiforsk, Stockholm.
- Broderick, X., & Marr, Y. (2012). *Dam safety performance monitoring and data management – Best practices*. CEATI.
- De Melo, L., & Conkle, C. (2024). *Dam safety performance monitoring and data management, best practices (2024 update)*. CEATI REPORT Nr. T222700-0256, DAM SAFETY INTEREST GROUP (DSIG).
- De Rubertis (Ed). (2018). *Monitoring Dam Performance*. ASCE, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 135. ISBN 978-07844-1482-8. 442p.
- Dunnicliff, J. (1988, 1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons, New York.
- Ekström, I., & Lier, Ø. (2013). *Behovsanalys för rörelsemätningar för dammar*. Elforskrapport 13:61, Elforsk, Stockholm.
- Fell, R., Foster, M., Cyganiewicz, J., Davidson, R., & Sills, G. (2024). *Methods for Estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping. The piping toolbox 2024. Guidance document*. Unicity Report No. R-470, The University of New South Wales, Australia. ISBN 978-0-7334-4093-9 .
- Fridén, H., Jacobson, A., & Björk, A. (2024). *Uni- och multivariata metoder för upptäckt av avvikelser i dammar*. Energiforsk 2024:986, Energiforsk, Stockholm.
- ICMM. (2020). *Global industry standard on tailings management*. ICMM, UN, PRI, August 2020.
- ICOLD. (1982). *Automated observation for the safety control of dams*. ICOLD Bulletin 41 ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (1988). *Dam monitoring. General considerations*. ICOLD Bulletin 60, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (1989). *Monitoring of dams. State of the art*. Bulletin 68, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (1992). *Improvement of existing dam monitoring*. ICOLD Bulletin 87, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2000). *Automated dam monitoring. Guidelines and case histories*. ICOLD Bulletin 118, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2008). *General approach to dam surveillance*. ICOLD Bulletin 138, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2009). *Surveillance: basic elements in a "dam safety" process*. ICOLD Bulletin 138, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2011). *Reservoirs and seismicity. State of knowledge*. ICOLD Bulletin 137, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2011). *Small dams, design surveillance and rehabilitation*. ICOLD Bulletin 157, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2017). *Dam Safety Management - Operational phase of the dam life cycle*. ICOLD Bulletin 154, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2017). *Dam safety management: operational phase of the dam life cycle*. ICOLD Bulletin 154, ICOLD/CIGB.

- ICOLD. (2017). *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations*. ICOLD Bulletin 164, ICOLD/CIGB.
- ICOLD. (2018). *Dam surveillance guide*. ICOLD Bulletin 158, ICOLD/CIGB.
- Jacobson, A., Fridén, H., & Björk, A. (2022). *Metoder för datadriven dammövervakning*. Energiforsk 2022:855.
- Jacobson, A., Johansson, T., Fridén, H., & Björk, A. (2021). *Detektion av givar- och kommunikationsfel*. Energiforsk 2021:735.
- Johansson, S., & Nilsson, Å. (2005). *Internal erosion detection at the Røsvatn test site. Experiences from blind test using resistivity, self potential, temperature and visual inspection*. Elforskrapport 05:42, Elforsk, Stockholm.
- Johansson, S., Bartsch, M., Landin, O., Barmen, G., Dahlin, T., & Ulriksen, P. (1995). *Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar*. VASO dammkommittés rapport nr. 21, Elforsk, Stockholm.
- Johansson, T., Fridén, H., Samuelsson, M., & Björk, A. (2020). *Datadrivna metoder för att detektera avvikande mätvärden inom dammsäkerhet*. Energiforskrapport 2020:640, Energiforsk, Stockholm.
- Kraftverksföreningens Utvecklingsstiftelse, VAST. (1991). *Betong i vattenkraftanläggningar*. Stockholm: ISBN 9187 334 070.
- Lagerlund, J. (2025). *Dokumentation från rivning av testdammen i Älvkarleby*. Ej publicerad, Energiforsk, Stockholm.
- Lagerlund, J., & Nilsson, Å. (2020). *Anslutningar i fyllningsdammar. Utformning, möjliga skador, detektion och åtgärder*. Rapport 220:643, Energiforsk, Stockholm.
- Lier, E., Getinic, F., Ekström, I., Lauknes, T. R., & Y., L. (2015). *Insar on embankment dams. Pilot on deformation measurement*. Energiforskrapport 2015:212, Energiforsk, Stockholm.
- Ljunggren, M., Logan, T., & Fløystad, A. (2023). *The instrument data quality cycle (DQC)*. 91:a Annual ICOLD meeting, Göteborg, Sverige, 13-14 juni 2023.
- Malm, R., Enzell, J., & Mohlin, B. (2019). *Kartläggning av instrumenteringssystem för betongdammar*. Energiforskrapport 2019:596, Energiforsk, Stockholm.
- Mohlin, B., & Åström, A. (2019). *Erfarenheter av damminstrumentering*. Energiforskrapport 2019:577, Energiforsk, Stockholm.
- Nilsson, Å. (1995). *Beprövade metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar*. VASO dammkommittés rapport nr. 20, Elforsk, Stockholm.
- Nilsson, Å. (2014). *Dam safety performance monitoring and data management kortversion*. Energiforskrapport 14:9, Energiforsk, Stockholm.
- Nilsson, Å., Torstensson, I., & Nilsson, C.-O. (2015). *Dam Safety Upgrade of Earthfill Dam with Timber Sheet Piles Walling - Case Study with Vertical Drains*. ICOLD Q98 – R-28, Stavanger, (ss. 409-428).
- NVE, Løkke, A. (2024). *Poretryckmätningar på dammer*. Norges vassdrags- og energidirektorat, NVE Extern rapport nr. 15/2024, Oslo.
- Reschetiuk, Y., Rylander, M., Haas, H., Andersson, R., Mohlin, B., & Ekström, I. (2022). *Mätmetoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar*. Energiforskrapport 2022:861, Energiforsk, Stockholm.
- RIDAS. (2011). *TV 7.2 Fyllningsdammar*. Energiföretagen/ Svensk Energi, Stockholm. .
- RIDAS. (2020). *TV9 Betongdammar*. Energiföretagen/Svensk Energi, Stockholm.
- RIDAS. (2020). *TV9 Fyllningsdammar*. Energiföretagen/Svensk Energi, Stockholm.
- RIDAS. (2020). *TV9 Grundläggning*. Energiföretagen/Svensk Energi, Stockholm.
- RIDAS. (2022). *Huvuddokument*. Energiföretagen/Svensk Energi, Stockholm.
- Sjödahl, P., Johansson, S., & Dahlin, T. (2019). *Geofysiska metoder inom dammsäkerhetsområdet. En kunskapssammanställning*. Energiforskrapport 2019:571, Energiforsk, Stockholm.

- Svensson, M. (2015). *Mätning och modellering med obemannade luftfartyg (UAS) och fotogrammetri. Utvärdering av noggrannhet för tillämpning på fyllningsdammar*. Energiforskrapport 2015:154, Energiforsk, Stockholm.
- Svk. (2019). *Dammar och dammteknik, en introduktion*. Svenska kraftnät, Stockholm.
- Toromanovic, J. (2024). *Monitoring and modelling of embankment dams*. Doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Vannkraft Hafslund Eco. (2023). *Braskereidfoss Hendelse 9 augusti 2023*. DNV, Rapportnr:2023-4089, Rev 1, Dokumentnr: 2010341.
- Vattenfall AB. (1988). *Jord- och stenfyllningsdammar*. Stockholm.
- Viklander, P., Lagerlund, J., Riaz, S., & Nordström, E. (2023). Non-destructive test methods for detecting defects in an experimental embankment dam. *International Journal on Hydropower and dams* 30(3): 74-79.
- Wolfsborg, R. (2025). Definitioner av termer. *Personlig kommunikation baserad på presentation vid "CEATI Project and Workshop on Functional Block Diagrams"*, 2025-03-27. Palm Springs CA, USA.

VÄGLEDNING FÖR MÄTNING OCH UTVÄRDERING AV DAMMARS FUNKTION

Dammars säkerhet är i ständigt fokus. I detta är mätning och långsiktig övervakning grundläggande. Denna rapport är en sammanställning av kunskap inom området dammätning och dammövervakning. Instrumentering installeras vid olika skeden och med olika syften för att följa dammars status och beteende, men oavsett kräver mätsystemen underhåll och skötsel. För att kunna utföra en bra utvärdering av mätdata krävs en god förståelse av mättekniken samt vad mätvärdet representerar. Simuleringar av tryck, vattenströmning och temperatur kan användas som underlag vid tolkning av mätresultat, vilket blivit alltmer vanligt vid dammsäkerhetsanalyser. Att övervaka felmoder och att i ett tidigt skede upptäcka förändringar i dammarnas funktion är en förutsättning för att upprätthålla en hög dammsäkerhetsnivå.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

