RAPPORT

Mulighetsstudie
«Instrumentering og overvåking av damanlegg»

OPPDRAGSGIVER
Energi Norge

EMNE
Daminstrumentering, damovervåking

DATO / REVISJON: 03. FEBRUAR 2020 / 03
DOKUMENTKODE: 10211223-RIEn-RAP-001

Multiconsult

Denne rapporten er utarbeidet av Multiconsult i egen regi eller på oppdrag fra kunde. Kundens rettigheter til rapporten er regulert i oppdragsavtalen. Hvis kunden i samsvar med oppdragsavtalen gir tredjepart tilgang til rapporten, har ikke tredjepart andre eller større rettigheter enn det han kan utlede fra kunden. Multiconsult har intet ansvar dersom rapporten eller deler av denne brukes til andre formål, på annen måte eller av andre enn det Multiconsult skriftlig har avtalt eller samtykket til. Deler av rapportens innhold er i tillegg beskyttet av opphavsrett. Kopiering, distribusjon, endring, bearbeidelse eller annen bruk av rapporten kan ikke skje uten avtale med Multiconsult eller eventuell annen opphavsrettshaver.

Multiconsult

RAPPORT

OPPDRAG	**Mulighetsstudie "Instrumentering og overvåking av damanlegg"**	DOKUMENTKODE	10211223-RIEn-RAP-001
EMNE	Daminstrumentering, damovervåking	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAGSGIVER	**Energi Norge**	OPPDRAGSLEDER	Tiemen Gordijn
KONTAKTPERSON	Einar Kobro/Kjetil Værnes	UTARBEIDET AV	Hui Lu, Stefan Hoppe, Stig Arne Strokkenes
		ANSVARLIG ENHET	10105060 Seksjon for dammer og undergrunnsanlegg

SAMMENDRAG

Denne mulighetsstudien er utført på oppdrag fra Energi Norge som en del av prosjektet «Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv».

Det gis en oversikt over overvåkingsmetoder for dammer, aktuelle problemstillinger, skadeårsaker og bruddmekanismer. Studien er en skrivebordsstudie av norsk og internasjonal praksis og fokuserer spesielt på hovedtyper av instrumentering fra tradisjonelle til nyeste typer, spesielt på typene som kan automatiseres, fjernavleses og er integreringsvennlige. Det gjøres en gjennomgang av tilgjengelig verktøy (programvare) for overvåking og det gis eksempler på presentasjoner der måleverdier er sett i sammenheng. Fokuset er automatisering av instrumentering, datainnhenting og presentasjon, samt videre forhold som tolking av data, potensielle terskel- eller utløserverdier og typiske dambruddsmekanismer, sett fra et damovervåkings-perspektiv. Det gis anbefalinger om terskelverdier / utløserverdier og pålitelighet og det refereres eksempler fra Norge og internasjonalt.

03	03.02.2021	Revisjon etter kommentarer NVE	S.A. Strokkenes	T. Gordijn	T. Gordijn
02	18.11.2020	Revisjon etter kommentarer oppdragsgiver	S.A. Strokkenes	T. Gordijn	T. Gordijn
01	14.1.2020	Første revisjon	Hui Lu, S.A. Strokkenes	S.A. Strokkenes	S.A. Strokkenes
00	3.12.2019	Utkast for diskusjon med oppdragsgiver	Hui Lu, Stefan Hoppe	S.A. Strokkenes, Mike Heading	S.A. Strokkenes
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

(Tom side ved to-sidig utskrift)

INNHOLDSFORTEGNELSE

1 Bakgrunn 9
2 Tilnærming til oppgaven 12
2.1 Tilnærmingsfilosofi 12
2.2 Presentasjon av resultatene 12
3 Damovervåking 13
3.1 Trusler 13
3.2 Damovervåking og daminstrumentering 13
3.3 Norsk regelverk og praksis 16
4 Instrumentering 17
4.1 Innledning 17
4.2 Instrumenter 17
4.3 Supplerende og støttende instrumentering 21
4.3.1 Eksterne (ytre) variabler 21
4.3.2 Miljøforhold 21
4.3.3 Magasinnivå - hydrostatisk last og bølger 21
4.3.4 Vanntemperatur 23
4.3.5 Drivgods, tilstopping 23
4.4 Dataloggere og kommunikasjonssystemer 23
4.4.1 Sentraliserte systemer 23
4.4.2 Distribuerte systemer 25
4.4.3 Pålitelighet 27
4.4.4 Miljøforhold 28
4.5 Ingeniørers kompetanse angående instrumentering 28
5 Datainnsamling og -håndtering 30
5.1 Innledning 30
5.2 Beslutningsprosesser og systemintegrasjon for dameier 31
5.2.1 Beslutningstaking 31
5.2.2 Integrering med annen programvare 32
5.3 Prosess for å etablere et overordnet datahåndteringsverktøy 33
5.3.1 Utvikling og anskaffelser 34
5.3.2 Konfigurasjon 36
5.3.3 Oppstart av systemet 36
5.4 Funksjoner 38
5.4.1 Database og maskinvare 38
5.4.2 Sensorer 38
5.4.3 Beregning 38
5.4.4 Brukerprofiler 39
5.4.5 Datainnsamling 39
5.4.6 Dataeksport 39
5.4.7 Dataregistrering, validering og redigering 39
5.4.8 Alarmering 40
5.4.9 Rapporter 40
5.5 Datapresentasjon 41
5.5.1 Generelle egenskaper for diagrammer 41
5.5.2 Tidsavhengighet 42
5.5.3 Stedsavhengighet 43
5.5.4 Avhengighet av andre variabler 45
5.5.5 Kombinasjon av diagrammer 47
5.5.6 "Dashboard" - kartvisning - SCADA 48
5.5.7 Tabeller 51
5.6 Ytterligere funksjoner 52
5.6.1 GIS 52
5.6.2 Building Information Modelling – BIM 54
5.6.3 Statistiske modeller 55
6 Datatolking 57
6.1 Innledning 57
6.2 Typiske potensielle dambruddsforløp for norske dammer 58

6.2.1 Innledning 58
6.2.2 Sammendrag av dambrudds- og faresituasjoner 58
6.3 Utvalgte typer målinger og deres karakteristikker for overvåkning av dammer 60
6.3.1 Deformasjonsmålinger 60
6.3.2 Måling av lekkasjer 63
6.3.3 Måling av porevannstrykk 65
6.4 Bruk av overvåkningsdata for å få en bedre forståelse av tilstanden til en dam 66
6.4.1 Innledning 67
6.4.2 Mønstre som indikerer dambrudds- og faresituasjoner 67
6.5 Anbefalinger om terskelverdier og pålitelighet 75
6.5.1 Anbefalinger for å fastsette terskelverdiene 75
6.5.2 Pålitelighet 77
6.5.3 Spesielt om bruk av dynamiske eller faste utløser- eller terskelverdier 81
7 Oppsummering og anbefaling 83
8 Referanser 84

FIGURER

Figur 1 Trusler og faremomenter slik de er identifisert av Defra (Storbritannia) [11]. De fleste vil være relevante for norske dammer 13
Figur 2 Damovervåking som en del av et totalt damsikkerhetsprogram [8] 14
Figur 3 Omfang av begrepet "surveillance" (overvåking), markert er "monitoring" (instrumentering) som del av overvåkingen [7] 14
Figur 4 Damovervåkingen er avhengig av at alle elementer har god nok kvalitet! 15
Figur 5 Krav til instrumentering av norske dammer avhengig av konsekvensklasse, damtype og fundament etter dsf og Veileder 3/2019 [17] 16
Figur 6 Typisk oversikt over mulig installering av instrumentering for en betong gravitasjonsdam [18] 18
Figur 7 Typisk oversikt over mulig installering av instrumentering for en steinfyllingsdam med oppstrøms tetning av betong [18] 19
Figur 8 Typisk oversikt over mulig installering av instrumentering for en fyllingsdam [18] 19
Figur 9 Forskjellige systemer for å måle oppstrøms vannstandsnivå: hydrostatisk sensor (til venstre); pneumatisk system (i midten til venstre); avstandsmåler, auskultasjon (i midten til høyre); avstandsmåler, flottørsensor (midt til høyre) 22
Figur 10 Bestanddeler av et sentralisert system 25
Figur 11 Elementer som inngår i et distribuert system (til venstre), bilde av et kontrollskap (til høyre) 26
Figur 12 Typisk distribuert kommunikasjonssystem etter RST. A, D, E; F og G er forskjellige typer sensorer, B er kontrollskapet, C er kontrollskapet med DAS som kobles trådløst til kontrollsenteret drevet av et solcellepanel [18] 27
Figur 13 Ingress Protection Code (IP code) (venstre) og galvaniske isolasjonselementer (høyre) 28
Figur 14 Overvåkningsoppgaver fra datainnsamling til beslutningstaking 30
Figur 15 Viktige aspekter som skal tas i betraktning for beslutning om utforming og bruk av overvåkningsinstrumenter 32
Figur 16 Interessenter i forbindelse med damovervåking 34
Figur 17 Gjennomgang av informasjon for konfigurasjon av formler, historiske data, tegninger, tabeller etc. 37
Figur 18 Diagram som viser nivå på 5 piezometere avhengig av tid med nøyaktig måleverdier 42
Figur 19 Tidsdiagram som viser tre skalaer for eksterne variabler: Magasinnivå (masl), nedbør (l/m^2) og temperatur (°C) 43
Figur 20 Diagram som viser setninger av damkrona 44
Figur 21 Diagram som viser inklinometer-bevegelser i A- og B-retninger langs borehull 44
Figur 22 Diagram som viser lekkasjemåling mot vannstand for forskjellige tidsperioder 45
Figur 23 Diagram over lekkasjemåling mot vannstand i kronologisk rekkefølge for forskjellige tidsperioder 46
Figur 24 Radielle bevegelser i loddlinjer for tre forskjellige kontrollpunkter mot magasinnivå 46
Figur 25 Korrelasjon mellom radielle og tangentiale bevegelser av loddlinjen 47
Figur 26 Diagram som kombinerer eksterne variabler og radiell og horisontal loddlinjebevegelse på forskjellige kontrollnivå 48
Figur 27 Visualisering av ekstensometermålere over dilatasjonsfuge [18] 49
Figur 28 Visualisering av sanntids-verdier og alarmnivåer på dam sett fra nedstrøms side 49
Figur 29 Visualisering av sanntids-verdier og alarmnivåer på 3D-modell av en dam 50
Figur 30 Visualisering av sanntids-verdier med målere og søylediagram vist på plan 50
Figur 31 Visualisering av 3D-visning av dam i kombinasjon med verktøy-tips og pop-up-diagrammer 51
Figur 32 Eksempler på tabell med månedlig og årlig (i rødt og blått) maksimal- og minimumsverdi for eksterne variabler, i tillegg årlig middelverdi 52
Figur 33 Plassering av flere dammer på kartvisning 53
Figur 34 Plassering av målesøyler på damkrona med alarmnivåer 53
Figur 35 Kombinasjon av instrumenteringsdata med 3D-modell (BIM) 54
Figur 36 Statistisk evaluering av instrumenteringsdata 55
Figur 37 Evaluering av irreversible virkninger over tid 56
Figur 38 Overvåkingsstrategi – sammenheng mellom forskjellige typer data, iterasjons-prosess 58

Figur 39 Eksempel på en typisk akselererende deformasjonsprosess som kan ende i dambrudd 61
Figur 40 Eksempel på typisk utflatende deformasjonsprosess 61
Figur 41 Typiske setninger langs damkrona av en fyllingsdam (høydeavhengig) 62
Figur 42 Horisontale bevegelser i loddlinja observert på 4 steder langs damkrona 62
Figur 43 Vertikale bevegelser langs damkrona til en betongdam som en funksjon av tid - observasjon av virkningen av lufttemperatursvingninger og utvidelse over tid 63
Figur 44 Typiske lekkasjemålinger plottet sammen med tilsig og nedbør, Svartavassdammen i Haugsdalsvassdraget [6] 64
Figur 45 Manuelle (oransje og røde) og automatiske (rosa og grønn) målinger av lekkasje før og etter tetningsarbeider i 2015. Den blå linjen viser magasinvannstanden 65
Figur 46 Piezometrisk nivå/trykk inne i damkroppen som funksjon at tid 66
Figur 47 Piezometrisk nivå/trykk (vertikalaksen) in damkroppen som funksjon av magasinnivå (horisontalaksen) 66
Figur 48 Lekkasje og sporadisk misfarget lekkasjevann observert i flomløpskanalen (til venstre), høyt poretrykket (artesisk vann) observert i et borehull i damfoten (til høyre) 68
Figur 49 Stor grad av sammenheng mellom oppstrøms vannstand og piezometere installert i damsenter og damtå 69
Figur 50 Oversiktsbilde som viser dambruddet i Xe-Pian Xe-Namnoy Sidedam D [21] 69
Figur 51 Høyt poretrykk og høydepunkt korrelert med oppstrøms magasinvannstand, Sidedam D [21] 70
Figur 52 Setninger målt over de to siste månedene før dambruddet i takt med økningen av magasinvannstanden, Sidedam D [21] 70
Figur 53 Skisse som viser typisk erosjon og undergraving av damtå forårsaket av utilstrekkelig energidissipasjon [11] 71
Figur 54 Isola Serfinidammen i Italia til venstre og Kamuzu Barrage i Malawi til høyre 71
Figur 55 Batymetrisk undesøkelse som viser erosjon nedstrøms av Kamuzu Barrage 72
Figur 56 Målingene fra inklinometer 73
Figur 57 Målingene fra målebolter 74
Figur 58 Typiske helningsmålinger som angir bevegelser 74
Figur 59 Poretrykktilstand etablert ved sigevannsanalyse 76
Figur 60 Poretrykk etablert ved romlige fordelte funksjoner 77
Figur 61 Reduksjon av lekkasjemåling på grunn av isblokkering i systemet 78
Figur 62 Registrert lekkasjevolum under Aursjø-hendelsen 78
Figur 63 Lekkasje i lekkasjemålehus M3 plottet mot oppstrøms vannstand (Aursjøen) 79
Figur 64 Snødybde plottet mot nedbør og temperatur (Aursjøen) 80
Figur 65 Total nedbør i nedslagsfeltet for lekkasjemålehus M3 plottet mot de faktiske lekkasjemålingene som ble foretatt (Aursjøen) 80

TABELLER

Tabell 1 Oppsummert fra USSD [13] fordeler og ulemper med forskjellige datainnsamlingsmetoder 20
Tabell 2 Et utvalg av forskjellige leverandører og programvareløsninger 35
Tabell 3 Dambrudds- og faresituasjoner etter Defra 59

FORKORTELSER

3G / 5G	Tredje / femte generasjons mobiltelefonteknologi
AAS	Automated Auscultation System
ADAS	Automated Data Acquisition System
AI	Artificial Intelligence (kunstig intelligens)
BIM	Building Information Modelling
DAS	Data Acquisition System
Defra	Department for Environment Food and Rural Affairs [UK]
dsf.	Damsikkerhetsforskriften, 2010
DSHP	Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv
GIS	Geografisk informasjonssystem
GPRS	General Packet Radio Service
ICOLD	International Commission on Large Dams
IEC	International Electrotechnical Commission
IP code	Ingress Protection Code
OFITECO	OFICINA TÉCNICA DE ESTUDIOS Y CONTROL DE OBRAS, S.A.
NVE	Norges Vassdrags- og Energidirektorat
RST	RST Instruments Ltd.
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SINTEF	Stiftelsen SINTEF
SPANCOLD	Spanish Commission on Large Dams
UPS	Uninterruptible Power Supply
USSD	United States Society on Dams
VTA	Vassdragsteknisk ansvarlig

1 Bakgrunn

Innledning

Multiconsult Norge AS er engasjert av Energi Norge for å foreta en mulighetsstudie om instrumentering og overvåking av damanlegg. Oppgaven ligger under DSHP (Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv)-prosjektet hos Energi Norge. Multiconsult har engasjert OFITECO (Spania) som underkonsulent. På denne måten gjøres nyeste internasjonale ekspertise på damovervåking og –instrumentering tilgjengelig i Norge.

OFICINA TÉCNICA DE ESTUDIOS Y CONTROL DE OBRAS, S.A. (OFITECO) is a Spanish engineering company founded in 1971, due to the growing concern about dam and reservoir safety in the country. The main fields of activity comprise hydraulic and transport infrastructures.
Backed by the experience acquired over more than 40 years in the dam engineering sector OFITECO provides a comprehensive
dam and reservoir safety management program, including surveillance, O&M Standards, Emergency Action Plans, Safety Reviews and Risk Assessment.
OFITECO is highly experienced in Dam Monitoring, covering all services like design, implementation, upgrade and automation of monitoring systems, data management, data evaluation and safety assessment.

Multiconsult Norge AS er Norges eldste rådgivende ingeniørfirma med røtter tilbake til Norsk Vandbygningskontor (1908). Multiconsult har omtrent 3000 ansatte i Norge og utlandet. Vårt arbeidsfelt spenner over de fleste områder innenfor bygg og anlegg, inkludert dammer, vannkraft, tunneler og fjellanlegg, sol og vind, transmisjon og det meste innenfor miljø og landskapsarkitektur innenfor energisektoren.
Vår erfaring dekker alle stadier av damfagene, fra revurderinger, rehabilitering og ombygginger via design, prosjektering og planlegging til bygging av nye dammer.
Vi har også en lang historie og erfaring med geoteknisk og instrumenteringsrelevant prosjektering innenfor bygg og eiendom, anlegg og samferdselsprosjekter.

Bakgrunn for studien

Fram til januar 2018 er det registrert vannkraftanlegg med en total installert kapasitet på 33755 MW i Norge. Disse forsyner landet med 94,3 % av elektrisiteten som forbrukes her [1]. Fram til januar 2019 er det tilsvarende registrert 4165 dammer i Norge. Ifølge SINTEFs rapport "Storulykker i Norge. En utredning for NTNF" (1989), er det slått fast at "dammer utgjør en av de største potensialer for ulykker i Norge."[2] Damsikkerhet er derfor høyt prioritert når det gjelder samfunnssikkerhet.

I tråd med internasjonal forvaltningspraksis i en del land er det et direktorat (NVE) som representerer Olje- og energidepartementet og forvalter det juridiske rammeverket for alle aktører som er involvert i damsikkerhetsspørsmål. Dameieren har hovedansvaret for alle sider ved damsikkerheten[3], inkludert å oppdatere, vurdere og redusere risikoen til et akseptabelt nivå. Energi Norge, som representant for de fleste dameiere, har derfor engasjert Multiconsult for å gjennomføre denne studien.

Mål for studien

Instrumentering og overvåking er en av de støttene som norsk damsikkerhet er bygd på. Energi Norge ønsker å finne mer avanserte, pålitelige, nøyaktige og raske metoder/systemer for å overvåke dammene og å tolke og håndtere risikoen, spesielt for eksisterende dammer, gjennom å sammenstille, validere og presentere data.

Tidligere studier initiert av Energi Norge

Allerede i 2000 ga EBL (Energibedriftenes Landsforening) ut publikasjon 466-2000 "Håndbok for etterinstrumentering av dammer"[4].

Tidligere studier under DSHP-prosjektet er utført av Sweco/Norconsult[5] og BKK[6]. Sistnevnte laget en eksempelsamling, sett fra dameierens perspektiv. Avansert instrumentering ble studert i detalj av SWECO/Norconsult. Disse studiene diskuteres ikke i detalj i denne rapporten.

Studier internasjonalt - ICOLD

Internasjonalt er ICOLD en viktig pådriver for å samle internasjonal best praksis på damsikkerhet, instrumentering og overvåking. ICOLDs "Technical Committees"[1] har stått for hele ni bulletiner gitt ut i perioden 1969 til 2017:

- B21 General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams (1969)
- B23 General considerations on instrumentation for concrete dams. Note on the application of geodetic methods to the determination of the movements of dams (1972)
- B60 Dam monitoring. General considerations (1988)
- B68 Monitoring of dams and their foundations - State of the art (1989)
- B87 Improvement of existing dam monitoring (1992)
- B118 Automated dam monitoring systems (2000) [7]
- B138 Surveillance: Basic elements in a "Dam Safety" process (2009) [8]
- B154 Dam Safety Management: Operation phase of the dam life cycle (2017) [9]
- B158 Dam Surveillance guide (2011) [10]

Omfang og begrensninger i denne studien

Fokuset i denne rapporten vil ikke være på avansert instrumentering i seg selv, siden dette i all vesentlighet er utført tidligere. Fokuset vil heller være på automatisering av instrumentering, datainnhenting og presentasjon, samt videre forhold som tolking av data, potensielle terskel- eller utløserverdier og typiske dambruddsmekanismer, sett fra et damovervåkings-perspektiv.

Denne mulighetsstudien er åpen når det gjelder emnet, men innholdet er begrenset av budsjettet, tid tilgjengelig og forfatternes kunnskap og erfaring. Det er uunngåelig å ønske å vurdere hele systemet for damovervåking og potensielle bruddmekanismer når det gjelder tolking av data fra instrumenteringen. Likevel, denne studien er fokusert på å diskutere damsikkerhetsspørsmål ut fra instrumenterings-perspektivet.

[1] Committee on Dam Safety; Committee on Automated Monitoring of Dams; Committee on Dam Safety.

Litt om begrepsbruk

Begrep	NVE	I denne rapport
Grenseverdi	Del av beredskapsplanen, skal fastsettes for aktuelle måleparametere, jfr. dsf. § 7-2 og § 7-4 basert på vassdragsanleggets kapasitet	Verdier som ikke skal overskrides / underskrides uten at det utløser en (predefinert) handling eller aksjon fra damoperatørens side
Varslingsverdi	Brukes for å angi aktsomhets-/beredskapsnivåer, kan være avhengig av beredskapsnivåer. Veileder 3/2019 "Overvåking av vassdragsanlegg" refererer til "grenseverdier … og eventuelt andre varslingsverdier"	Brukes ikke. Nytter heller "terskelverdi" eller "utløserverdi" avhengig av situasjonen
Terskelverdi	Ikke definert	Verdier som ved overskridelse / underskridelse ikke nødvendigvis utløser beredskap, økt overvåking eller øyeblikkelige og tvingende tiltak. Terskelverdier kan f.eks. også brukes for å planlegge vedlikehold, mer nøyaktig registrering og arkivering av data osv.
Utløserverdi	Ikke definert	Verdier som ved overskridelse / underskridelse utløser forhåndsbestemte tiltak, eventuelt flere verdier som sammen utløser slike. Begrepet er ikke begrenset til beredskapstiltak

2 Tilnærming til oppgaven

2.1 Tilnærmingsfilosofi

Hovedhensikten i denne studien er å bringe inn avansert internasjonal erfaring i det norske dam-miljøet. Studien er i hovedsak en litteraturstudie. Vi ønsker å identifisere kommersielt tilgjengelig teknologi på topp-nivå som kan brukes direkte av dameierne. Teknologi som fortsatt er på forsknings-stadiet er i denne sammenheng av mindre interesse, som for eksempel kunstig intelligens.

Instrumentering for damovervåking, datainnhenting, –presentasjon og –tolking har blitt grundig studert av bl.a. ICOLD [7][8][10], Defra (Department for Environment Food and Rural Affairs (Storbritannia))[11], USSD (United States Society on Dams) [12][13], ANCOLD (Australian Commission on Large Dams) [14] og SPANCOLD (Spanish Commission on Large Dams) [15] som en del av dam-overvåkingsprogrammer. Teknologien for datainnhenting og presentasjon har dog stort sett vært et domene for leverandører av instrumentering. Dette er grunnen til at OFITECO er involvert i denne studien.

I alle disse studiene av daminstrumentering og overvåking drøftes det som på engelsk omtales som «Potential Failure Mode» (PFM). På norsk kan dette omtales som det potensielle brudd-modi og forstås som potensiell bruddsituasjon, potensiell svikt eller feilfunksjon. Det viktige er å forstå hva som kan gå galt i et større perspektiv og tilpasse damovervåkning til potensielle brudd-modi [16].

Observasjoner fra hele damovervåkingen (ikke bare instrumenteringen) indikerer typiske potensielle bruddforløp. I denne studien har vi samme tilnærming.

2.2 Presentasjon av resultatene

I denne rapporten presenterer vi vurderinger og resultater fra studien i kapitlene 3 til 6. Kort sammenfattet er innholdet slik:

Damovervåking – kapittel 3

I dette kapitlet ser vi på hvor damovervåkingen plasseres i et overordnet perspektiv. Instrumenteringen drøftes i detalj og dens plassering i det helhetlige overvåkingssystemet vises. Hensikten med damovervåking er å kunne følge opp dammens tilstand og instrumenteringen kan bidra til å oppnå dette målet (stabil dam).

Videre drøftes det norske regelverket som styrer daminstrumentering og damovervåking.

Instrumentering og datainnhenting – kapittel 4

I dette kapitlet drøftes instrumentering kortfattet, og det fokuseres på instrumenter, automatisk datainnhenting og utstyr for overføring av data. Pålitelighet av system for datainnhenting drøftes i detalj.

Datahåndtering og -presentasjon – kapittel 5

I dette kapitlet drøftes datahåndtering, datalagring og datapresentasjon. Forskjellige måter å kombinere og presentere data på, til hjelp for tolking av målingene, presenteres og drøftes i detalj.

Datatolking og -analyse – kapittel 6

I dette kapitlet drøftes typiske egenskaper ved de forskjellige typer måledata. Potensielle mekanismer for dambrudd, som er tatt fra litteraturen, skisseres og vurderes i sammenheng med norske forhold. Videre hvordan tolking av forskjellige typer måledata, som del av damovervåkingen, brukes til å vurdere damstabiliteten i detalj, eksemplifiseres med dammer i Norge og i utlandet. Momenter for hvordan etablere terskel-/utløserverdier drøftes.

3 Damovervåking

3.1 Trusler og faremomenter

Internasjonalt er det ansett at dammer krever høyt vedlikehold[13]. Før man drøfter damovervåking, er det nyttig å se på hva som kan være trusler og faremomenter for dammer. Vi definerer dette som hendelser eller tilstander som kan resultere i en risiko. Det som utløser en risiko, kan lede til brudd eller skade hvis den ikke møtes. Defra[11] i Storbritannia har identifisert og summert opp diverse trusler slik i Figur 1:

- ageing
- aircraft strike
- animal activity
- changes in groundwater flow/chemistry
- earthquake
- extreme rainfall/snow flood
- failure of nearby infrastructure
- failure of reservoir in cascade upstream
- human activity
- ice/frost
- layout, design or construction inadequate or inappropriate
- mal-operation
- mining/ mineral extraction
- sunlight
- terrorism/sabotage/accident
- water loading
- wind

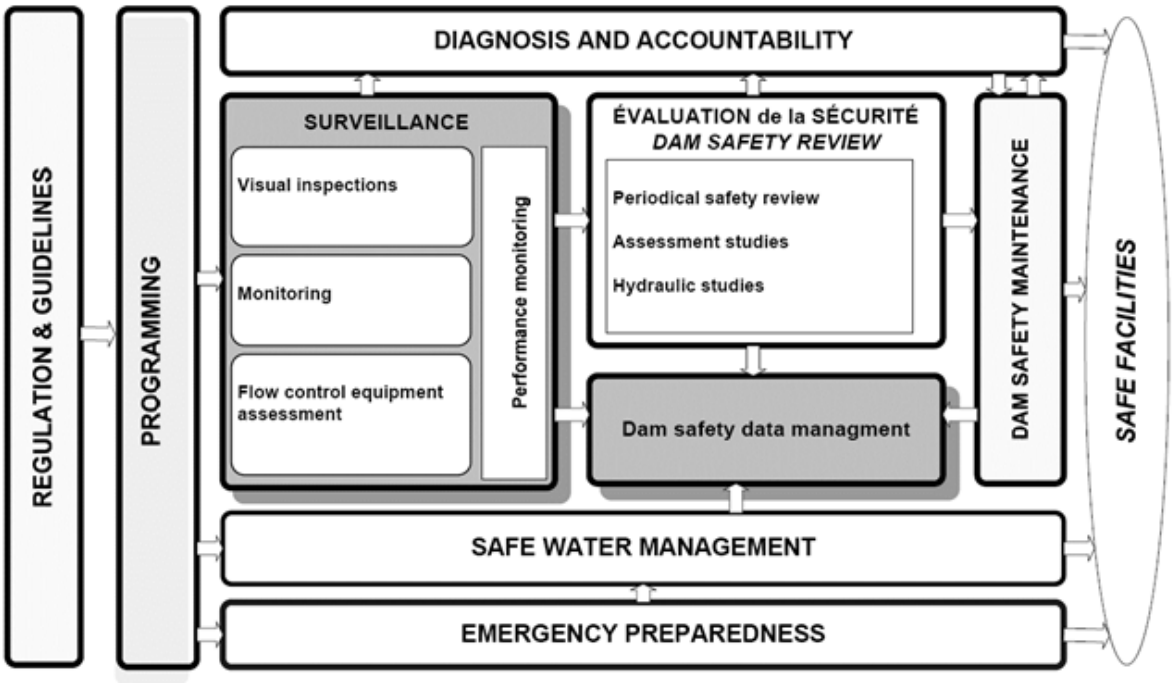
Figur 1 Trusler og faremomenter slik de er identifisert av Defra (Storbritannia) [11]. De fleste vil være relevante for norske dammer

Tilsvarende som i Storbritannia opplever også norske dammer endringer i miljø og andre forhold, slik som klima. Viktigheten av de forskjellige truslene som listes opp kan variere over tid. Det er derfor nødvendig å ha et tilpasset og fungerende program for tilsyn og overvåking som også tar hensyn til dette. Damovervåkingsprogrammet er et middel til å oppnå dette målet.

Defra lister opp 12 potensielle feilmodi og 46 risikomodi [11]. De forskjellige avvik og kombinasjoner av avvik i overvåking, inkludert instrumentering, som kan indikere brudd eller risiko for brudd drøftes. ICOLD [7][17], USSD [12][13], ANCOLD [14] og SPANCOLD [15] har liknende tilnærming. I denne rapporten tas dette opp på samme måte i detalj i kapittel 6.

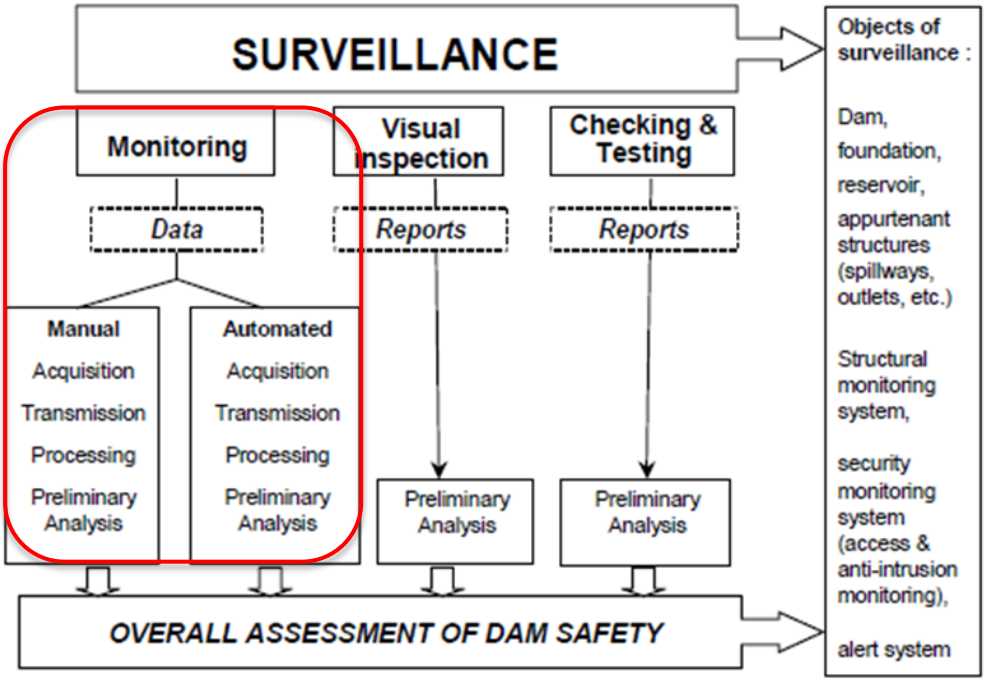
3.2 Damovervåking og daminstrumentering

Det er viktig å ha en korrekt forståelse av de forskjellige konseptene mht. damovervåking. Overvåkingen er et samlebegrep for interntilsyn, instrumentering og målinger. Overvåking i sum er et risikoreduserende verktøy som gir mulighet for tidlig identifisering (oppdagelse) av trusler og faremomenter slik at sannsynligheten for hendelser som kan lede til brudd reduseres[8][10]. Og overvåkning spiller en sentral rolle i ethvert damsikkerhetsprogram, jf. Figur 2.



Figur 2 Damovervåking som en del av et totalt damsikkerhetsprogram [8]

Damovervåkingen internasjonalt består vanligvis av periodiske (gjerne årlige) tilsyn, samt tilsyn etter ekstraordinære hendelser (f.eks. jordskjelv og store flommer) [14], og revurderinger med 5 til 20 års mellomrom, avhengig av ønsket detaljeringsgrad. Dette er i prinsippet også slik det norske systemet er bygd opp. Det grunnleggende målet er at forhold som kan føre til reduksjon av anleggets sikkerhet kan avdekkes så tidlig som mulig.



Figur 3 Omfang av begrepet "surveillance" (overvåking), markert er "monitoring" (instrumentering) som del av overvåkingen [7]

Det framgår at instrumentering bare er en del av damovervåkingen, dog er den økende og spiller ofte en nøkkelrolle siden den kan gi dypgående informasjon som visuell inspeksjon og tilstandsvurdering i felt ikke kan gi (se Figur 2 og Figur 3). Dette inkluderer ikke bare datainnsamling, men også en vurdering av dataene og tolking av resultatene. Målene med damovervåkingen er å bidra til en vurdering av damsikkerheten gjennom en tilstandsanalyse som sier noe om blant annet damstabiliteten både i dag og i framtida. Instrumenteringen, som del av overvåkingen, vil bidra til dette. Det er likevel viktig å ha klart for seg at instrumenteringen er ikke det eneste verktøyet som bidrar til damsikkerheten.

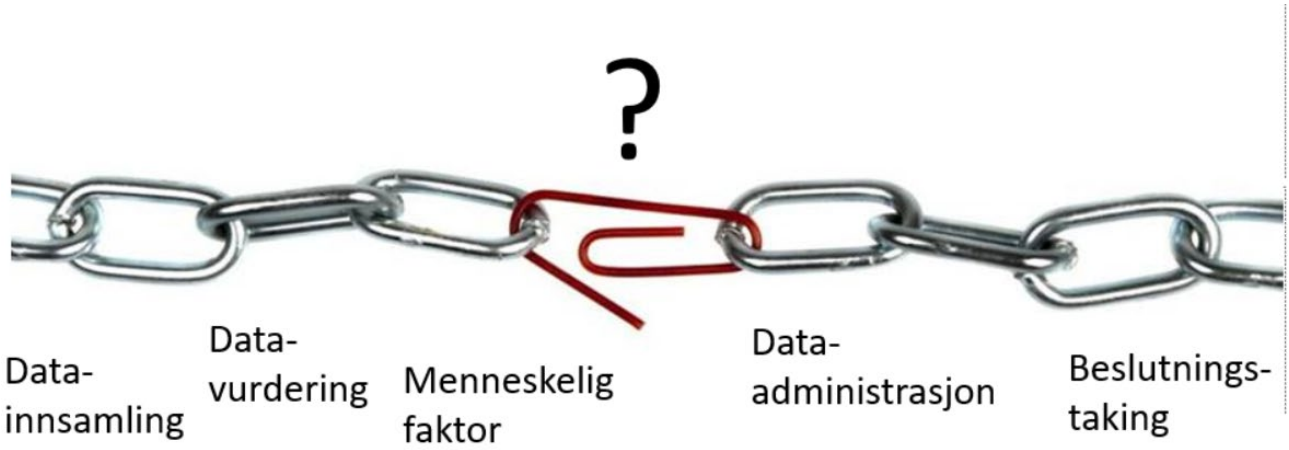
Man skal ikke gå ut fra at hvert enkelt overvåkingsinstrument har krystall-klar kopling til damstabiliteten. Begrensningene ved forskjellige typer instrumentering og de innsamlede data drøftes i detalj i kapittel 6.

I praksis vil damingeniøren (ofte Vassdragsteknisk ansvarlig, VTA) lete etter avvik i dataene fra sine instrumenter. Hvis avvik – eller kombinasjonen av avvik – indikerer at stabiliteten er truet, eller ingeniøren er i tvil, må målinger støttes og bekreftes med inspeksjoner, undersøkelser, prøving eller mer spesialisert instrumentering. Slik kan vedkommende bekrefte eller avkrefte om det er gjort en riktig tolkning av situasjonen. Det er i denne sammenheng viktig å ha et sett med forventede verdier som registrerte data kan sammenlignes med.

Oppsummert, et robust damsikkerhetsprogram må inkludere flere faktorer enn bare instrumenteringen:

- En kompetent ingeniør som har riktig forståelse av dammen
- Grundige inspeksjoner
- Riktige prøver og undersøkelser

Fundamentalt for en suksessfull damovervåking må data fra instrumenteringen bidra til ingeniørens vurderinger, forståelse og korrekte bedømmelse av en gitt situasjon eller tilstand, dette gjelder også for den mest moderne og avanserte instrumentering.



Figur 4 Damovervåkingen er avhengig av at alle elementer har god nok kvalitet!

3.3 Norsk regelverk og praksis

Damsikkerheten i Norge er dekket av damsikkerhetsforskriften [3] (dsf.) som er forvaltet ved NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat) som regulerende myndighet under Olje- og energidepartementet. Damsikkerhetsforskriften er hjemlet i lov om vassdrag og grunnvann (vannressursloven). NVE har gitt en rekke veiledere og retningslinjer som utfyller forskriften mht. prosjektering og drift av dammer og tilhørende konstruksjoner. Norske dammer klassifiseres etter potensielle bruddkonsekvenser fra konsekvensklasse 0 til 4 (større konsekvenser jo høyre klasse).

Damsikkerhetsforskriften med underliggende regelverk har bestemmelser om damovervåking som er på linje med internasjonal praksis. Det kreves periodiske inspeksjoner (tilsyn) (minst én gang hvert år), større inspeksjoner (hovedtilsyn) (hvert 5./7. år), spesiell inspeksjon under og etter unormale situasjoner / store påkjenninger på anlegget samt revurdering av dammene hvert 15./20. år). (Dammer i klasse 0 har ikke krav om tilsyn.)

Regelverket for tilsyn og overvåking av vassdragsanlegg har nylig blitt oppdatert og er nå samlet i Veileder nr. 3/2019 Overvåking av vassdragsanlegg [18]. (Regelverket for revurdering er samlet i Veileder nr. 1/2018 Revurdering av vassdragsanlegg.) Tabell 7-2.2 i dsf. og Veileder 3/2019 er vist i Figur 5:

§ 7-2 femte ledd: Det stilles følgende krav til instrumentering for måling av dammer: Dammer i konsekvensklasse 1 skal ha vannstandsskala for overvåking av vannstand. Dammer i konsekvensklasse 2, 3 og 4 skal ha instrumentering for måling av følgende måleparametere:

Damtype	*Klasse*	*Vannstand*	*Lekkasje*	*Deformasjoner*	*Poretrykk*
Fyllingsdam fundamentert på god berggrunn	*2, 3, 4*	x	x	x	
Fyllingsdam fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	*2, 3, 4*	x	x	x	x
Betong- og murdam fundamentert på god berggrunn	*3, 4*	x	x	x	
	2	x	x		
Betong- og murdam på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	*3, 4*	x	x	x	x
	2	x	x		x

Figur 5 Krav til instrumentering av norske dammer avhengig av konsekvensklasse, damtype og fundament etter dsf. og Veileder 3/2019 [18]

Disse kravene er i utgangspunktet minimumskrav som gjelder alle dammer. For dammer som er i dårlig forfatning eller hvor tilstanden ikke er kjent, eller hvor forholdene ellers gjør det nødvendig, bør damingeniøren (VTA eller rådgiver) beskrive mer, bedre eller mer avansert og egnet instrumentering for å tolke dammens oppførsel bedre. VTA har det faglige ansvaret for å rapportere dammens sikkerhetstilstand til vassdragsteknisk leder (jfr. dsf § 2-4). Derfor må han bruke sin kompetanse og kunnskap sammen med data fra instrumenteringen!

4 Instrumentering

4.1 Innledning

Overvåkningsinstrumenter fremskaffer data om dammens tilstand. Overvåking skal i sum avdekke konstruktive mangler som skyldes feil i prosjektering/utførelse, overskridelse av laststørrelser og mangler/feil i materialer. Overvåking skal også avdekke overskridelse av grenseverdier for beredskap.

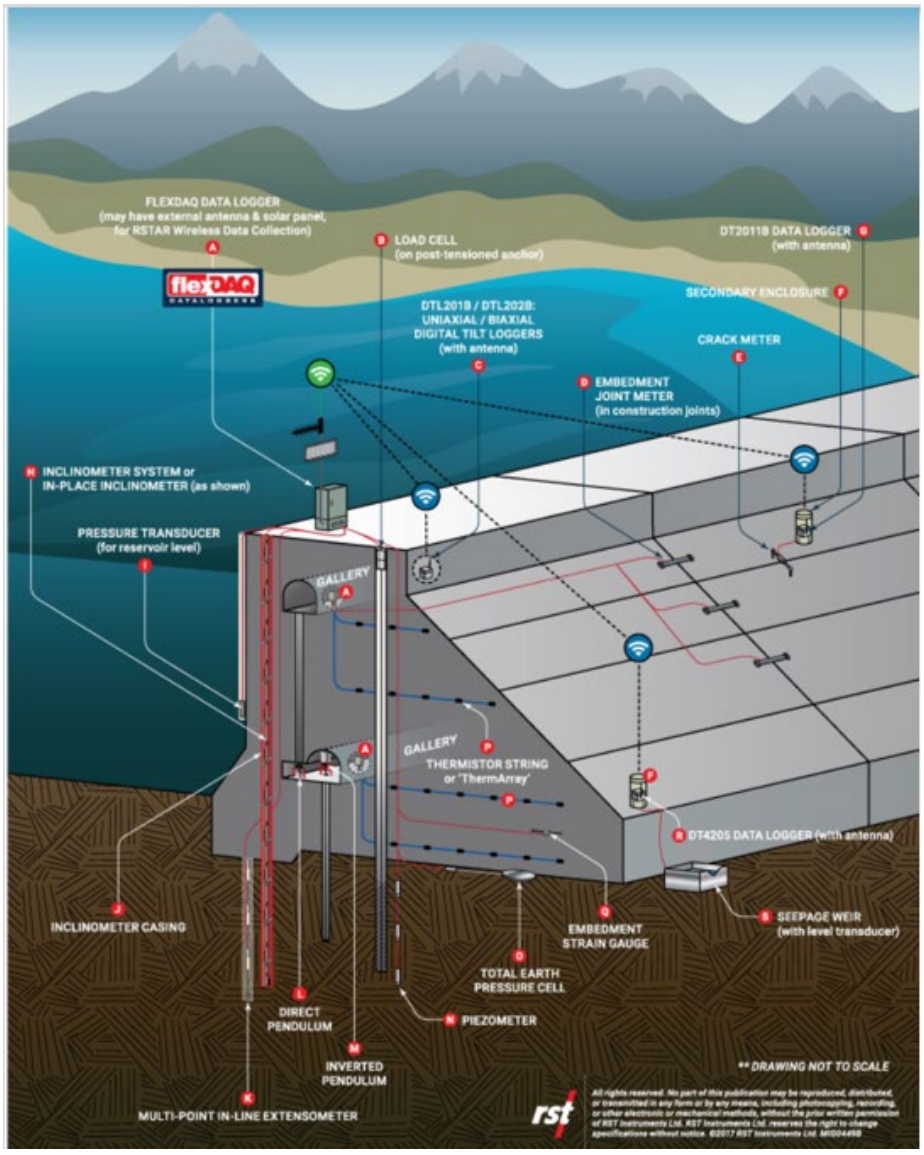
Dette kapittelet omhandler datainnsamlingen og overføringsdelen av et overvåkningssystem (Figur 3). Som diskutert i kapittel 1, er overvåkningsinstrumenter ikke hovedfokuset i denne rapporten, ettersom de ble behandlet i detalj i tidligere DSHP-studier[4][6]. For å sette denne rapporten inn i en kontekst, er forskjellige instrumenter kort omtalt i avsnitt 4.2. Dette kapittelets hovedfokus er ulik instrumentering med støttefunksjoner, spesielt med henblikk på definisjon, rolle, nytte og maskinvaren for datainnsamling.

4.2 Instrumenter

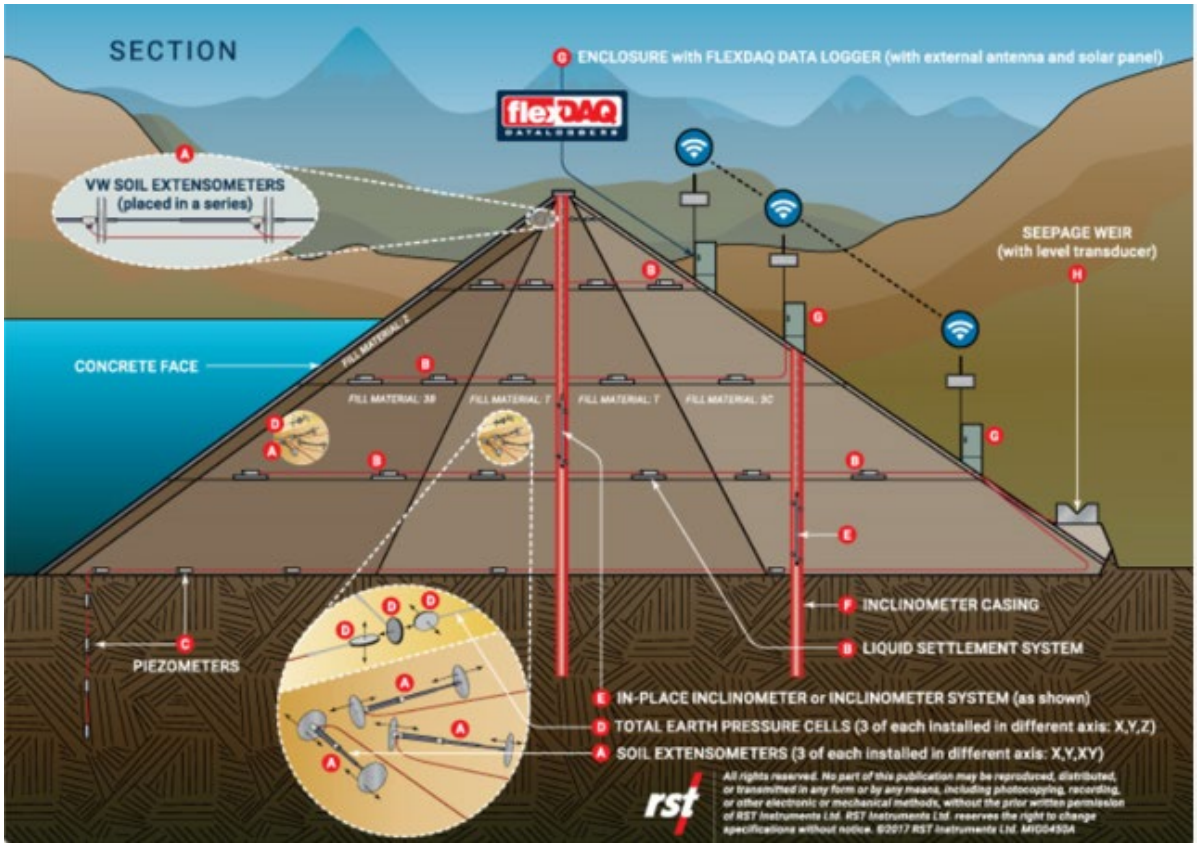
En typisk oversikt over kontinuerlig fjernavlesning av overvåkningsinstrumenter for henholdsvis betong gravitasjonsdammer, steinfyllingsdammer med oppstrøms tetningsplate av betong samt fyllingsdammer er oppsummert av instrumenteringsleverandøren RST [19] som vist i Figur 6, Figur 7 og Figur 8:

Det bør nevnes at de innlagte instrumentene vist i figurene nedenfor dekker alle fire måleparametere (vannstand, lekkasje, deformasjon og poretrykk) som kreves i dsf.[3]. Alle instrumenter kan leses eksternt og kontinuerlig, noe som samsvarer med og går utover NVEs anbefalinger om avlesningsfrekvens [18]. Dessuten kan spenningsmåling (som for eksempel lastceller, jordtrykkceller og ekstensometer) og støttemålinger (som for eksempel termometerstreng, værstasjon og videokamera) også leses eksternt og kontinuerlig.

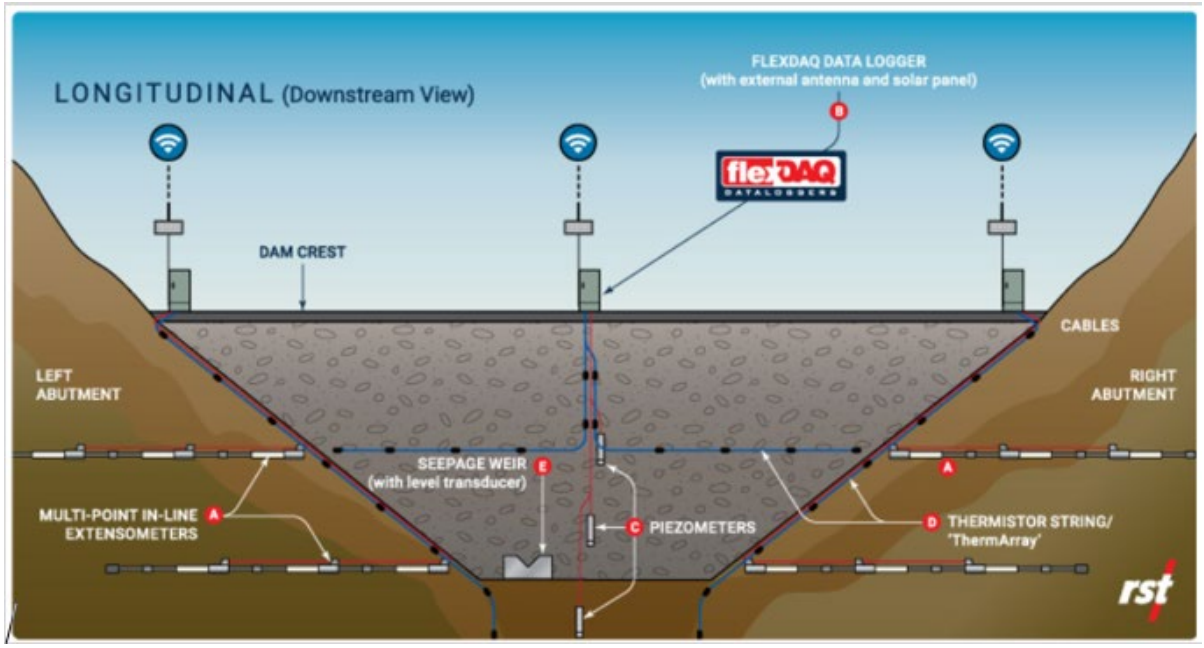
RSTs oversikt over automatiske fjernavlesningsinstrumenter for overvåking av dammer representerer generelt det fremste innenfor instrumentering som er tilgjengelig på det internasjonale kommersielle markedet. Disse instrumentene er mer anvendelige for store dammer. For noen mindre dammer har manuell avlesing eller frittstående dataloggere fremdeles sine fordeler. Fordelene og ulempene med forskjellige datainnsamlingsmetoder er oppsummert nedenfor av USSD[13] som vist Tabell 1:



Figur 6 Typisk oversikt over mulig installering av instrumentering for en betong gravitasjonsdam: A1) FlexDAQ Data Logger A2) L900 RSAR Array Radio Series B) Load Cells C) Uniaxial/Biaxial Tilt Loggers D) Embedment Joint Meter E) Crack Meter F) Secondary Enclosure G) DT2011B Data Logger H1) Inclinometer System H2) In-Place Inclinometer I) Pressure Transducer J) Inclinometer Casing K) Multi-Point In-Line Extensometer L) Direct Pendulum M) Inverted Pendulum N) Piezometer O) Total Earth Pressure Cell P) Thermistor String Q) Embedment Strain Gauge R) DT4205 Data Logger S) Seepage Weir [19]



Figur 7 Typisk oversikt over mulig installering av instrumentering for en steinfyllingsdam med oppstrøms tetning av betong: A) VW Soil Extensometers B) Liquid Settlement System C) Piezometer D) Total Earth Pressure Cell E1) Inclinometer System E2,I) In-Place Inclinometer F) Inclinometer Casing G) FlexDAQ Data Logger H) Seepage Weir J) Crack Meter K) Submersible Tilt Meter L) Embedment Joint Meter M) Embedment Strain Gauge [19]



Figur 8 Typisk oversikt over mulig installering av instrumentering for en fyllingsdam: A) In-Line Extensometers B) FlexDAQ Data Logger C) Piezometer D) Thermistor String E) Seepage Weir F) Liquid Settlement System G1) Inclinometer System G2) In-Place Inclinometer H) Inclinometer Casing I) Digital Thermarray System J) Permeation Grout Monitor [19]

Tabell 1 Oppsummert fra USSD [13] fordeler og ulemper med forskjellige datainnsamlingsmetoder

Datainnsamlingsmetode	Fordeler	Ulemper
Manuelle avlesninger	• Generelt lett å utføre og krever ikke en høy grad av ekspertise • Kan utføres av personell som allerede er på stedet • Evaluering av datakvalitet kan gjøres ved innsamling	• Arbeidsintensiv med hensyn til datainnsamling og bearbeiding • Ikke praktisk ved hyppig innsamling av data • Potensiale for feil ved overføring av data fra registreringsark til databehandlings/presentasjonsverktøy • Ikke praktisk ved fjerntliggende dammer hvor det ikke ofte er personell til stede
Frittstående dataloggere	• Hyppig og hendelsesdrevet data innsamling • Konsistent datainnsamling og elektronisk databehandling • Relativt rimelig utstyr som er enkelt å installere	• Krever ekspertise for konfigurasjon av dataloggere • Datakvaliteten kan ikke kontrolleres før dataene er samlet inn - lastet ned og registrert i felt • Kan potensielt slås ut av lyn • Strømkilder må vurderes nøye
Sanntids overvåkningsnettverk	• Hyppig og hendelsesdrevet data innsamling • Konsistent datainnsamling og elektronisk databehandling • Sanntidsvisning og varsling (24/7) • Reduserer arbeidsinnsats for datainnsamling og bearbeiding • Fjernstyring av overvåkningsfrekvens og datainnsamlingsoppsett etter behov • Muliggjør rask vurdering av overvåkningsdata	• Automatisering kan føre til mindre årvåkenhet hvis helheten i overvåkningsprogrammet ikke er veldefinert eller forstått • Krever en høyere grad av ekspertise for installering og vedlikehold • Høyere kostnader for installasjon og vedlikehold • Behovet for ofte og regelmessig visuell inspeksjon kan bli neglisjert på grunn av tilgjengeligheten og sanntidspresentasjon av automatisk registrerte data • Kan potensielt slås ut av lyn • Strømkilder må vurderes nøye

4.3 Supplerende og støttende instrumentering

Dette kapitlet tar sikte på å gjennomgå eksisterende teknologi for de elementer som fungerer som støtte for eller komplimentering til instrumenteringen som er installert i en dam for oppfølging og overvåking av hvordan den oppfører seg strukturelt. Merk at i denne sammenheng blir vannstanden i magasinet (mot dammen) definert som ytre (ikke strukturell) overvåking!

4.3.1 Eksterne variabler

Hvordan en dam oppfører seg er hovedsakelig betinget av ytre faktorer som påvirker anlegget samt grunnforholdene under dammen. Disse variablene er for eksempel som følger:

- Miljøforhold
- Vannstand og bølger i magasinet / mot dam
- Vanntemperatur / is
- Drivgods (tilstopping)
- Ras / skred (bølger, tilstopping)

I de følgende underavsnitt vil vi indikere de mest brukte metodene og teknikkene for å måle de nevnte variablene.

4.3.2 Miljøforhold

Noen dammer har en meteorologisk stasjon, som kan være automatisert eller ikke, som gir informasjon om miljøforholdene som påvirker både dammen og magasin. De viktigste variablene målt ved en typisk meteorologisk stasjon i tilknytning til et magasin er:

- Nedbør
- Fordamping
- Vindhastighet og retning
- Solinnstråling
- Relativ luftfuktighet
- Lufttemperatur

Disse variablene kan være viktige for tolkningen av overvåkningsdata på dammen. Hvis man hverken har personer til stede eller værstasjon på dammen, har *senorge.no* et stort datasett med interpolerte klimadata. Påliteligheten til dette datasettet endres fra sted til sted og fra parameter til parameter, men i mangel av værstasjoner kan det være et nyttig tillegg til andre overvåkningsdata.

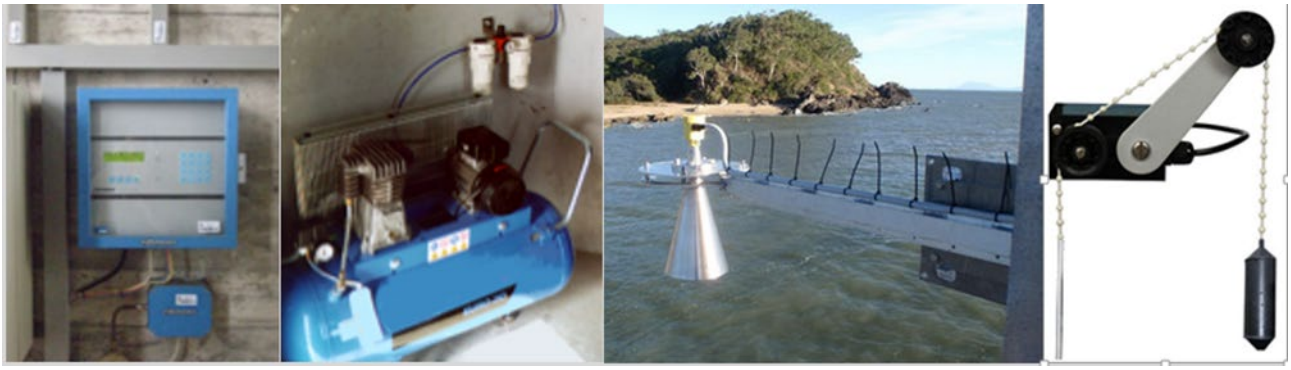
4.3.3 Magasinnivå - hydrostatisk last og bølger

Oppstrøms vannstand kan kontinuerlig overvåkes med instrumenter basert på følgende tre ulike prinsipper:

- Måling av hydrostatisk last (vannstand) direkte med en trykksensor.
- Måling av vannstand / reservoarnivå indirekte med pneumatiske (eller boble-) systemer.
- Måling av avstanden mellom vannoverflaten og et fast punkt på dammen (avstandsmålere).

Trykksensor

Et *hydrostatisk* system brukes hovedsakelig der hvor en har direkte tilgang til vanntrykk. Det utføres ved nedsenking av en trykksonde under vann. Trykksonder er de mest brukte i betongdammer internasjonalt. Et typisk eksempel er vist i Figur 9:



Figur 9 Forskjellige systemer for å måle oppstrøms vannstandsnivå: hydrostatisk sensor (til venstre); pneumatisk system (i midten til venstre); avstandsmåler, auskultasjon (i midten til høyre); avstandsmåler, flottørsensor (midt til høyre)

Pneumatiske systemer

I et *pneumatisk- eller boblesystem* pumper en kompressor luft inn i en brønn gjennom et rør og mottrykket blir målt. Pneumatiske systemer krever ikke direkte tilgang til vanntrykk fra selve dammen og er det mest brukte systemet i fyllingsdammer internasjonalt. Et typisk pneumatisk system er vist i Figur 9. Det bør nevnes at atmosfærisk trykk-kompensasjon må foretas for både et hydrostatisk og et pneumatisk system.

Avstandsmålere

Avstanden mellom vannoverflaten og et fast punkt i dammen kan måles direkte av en avstandsmåler. Avstandsmålere kan deles inn i *auskultasjonsmålere* (ultralydsensor og mikrobølgeradar) og *flottørsensorer* som vist i Figur 9.

Begrensninger for bruken av avstandsmålere er:

- Det ikke forventes store vannstandsendringer.
- Brukes hvor det er fri sikt mellom referansepunktet og vannspeilet.
- Det er ingen turbulens/bølger på overflaten av vannet.
- Brukes når det ikke er flytende gjenstander på vannoverflaten eller når dette kan unngås.
- Det ikke forventes svært dårlige værforhold (kraftig nedbør eller veldig tett tåke).

Blant de forskjellige systemene som finnes for å måle avstander mellom to punkter, er ultralydsensorer og mikrobølgeradar-utstyr de mest brukte målerne innenfor damauskultasjon.

Et annet eksempel på avstandsmålere er flottørsensorer som ikke påvirkes av turbulens og værforhold ved måling av vannstand.

Vannstandsmåling basert på flottørsensorer er mye brukt i dammer og anlegg der det ikke er behov for å måle store variasjoner i vannstand. Konseptets avhengighet av mekaniske bevegelige deler kompenseres av dets presisjon og langtidsstabilitet.

Rekkevidden av ultralyd- og mikrobølgeradarmålere er henholdsvis 10 og 30 meter. Nøyaktigheten er omtrent 0,1 %. Rekkevidden og nøyaktigheten til flottørsensorer er veldig avhengig av de mekaniske bevegelige delene.

Måling av bølger

Ingen eksempler på instrumentmåling, visuell vurdering må til!

4.3.4 Vanntemperatur

I noen tilfeller er det nyttig å måle vanntemperatur for å kontrollere den termiske påvirkningen (istrykket) på dammen eller for å vurdere sannsynligheten for isdannelse og istrykk. Det er flere målemetoder, men en av de vanligste temperatursensorene er PT-100-sensoren som gir utmerket stabilitet over tid.

I betongdammer som er under bygging kan de legges inn på innsiden av betongplaten oppstrøms. I eksisterende dammer er de vanligvis installert på vannsida av dammen eller i et inntak og må derfor være godt festet og tilkoblet. Avhengig av forventede svingninger i magasinvannstanden, kan flere sensorer installeres i forskjellige høyder.

I noen tilfeller kan magasintemperatur også være nyttig for å forstå kilden til vannlekkasjer hvis temperaturmålinger av lekkasjevannet er tilgjengelige. Vanntemperaturen kan også ha betydning for resultatene fra deformasjonsmålinger.

4.3.5 Drivgods, tilstopping

Det finnes ingen gode eksempler på instrumentmåling. Vannstandsmåling «oppstrøms og nedstrøms» kan være en god sekundær indikator, en god analogi er falltapsmåling over varegrind. Dette tenkes brukt som et tillegg til, ikke som erstatning for, eventuell instrumentering for registrering av lukeåpning.

4.4 Dataloggere og kommunikasjonssystemer

Den grunnleggende støtten for å opprettholde kontinuerlig overvåking av anleggenes oppførsel er å ha datainnsamlingssystemer (Data Acquisition System – DAS) installert i/ved dammen som kan samle og overføre informasjonen. All informasjonen som leveres av instrumenteringen installert i dammen kan samles i et kontrollrom og dermed lette tilgangen og behandlingen av dataene.

I dag er nesten alle de moderne overvåkingssystemene utstyrt for å kunne gjøre automatisk avlesing.

Automatic Auscultation System (AAS) – kan generelt deles inn i to kategorier:

- Sentralisert system
- Distribuert system

4.4.1 Sentraliserte systemer

I den sentraliserte systemløsningen overføres alle signalene fra sensorene til dataloggeren ved hjelp av metallkabler. Signaler behandles av Data Acqusition System (DAS) som er integrert i dataloggeren.

Elementene som utgjør det sentraliserte systemet er vist i skjemaet på Figur 10. De sentraliserte automatiske overvåkingssystemene er generelt sammensatt av følgende elementer:

- Et nettverk av sensorer og transdusere (omgjør variasjoner i fysiske parametere som vanntrykk til elektriske signaler) som gjennom et ledningsnett overfører elektriske signaler som dataloggeren registrerer.

- En manuell registreringsboks samler signalene som leveres av sensornettverket, slik at leses av brukerne på bærbare avlesningsterminaler.
- Et datainnsamlingskabinett (“datalogger”) som mottar signalene fra den manuelle avlesningsboksen utfører automatisk registrering og hvis nødvendig behandler og lagrer dataene for til slutt å overføre de registrerte verdiene til kontrollsenteret ("driftssentralen").
- Eventuelt kan en datamaskin på samme sted som brukes som SCADA-datamaskin også nyttes for datapresentasjon og rapportfremstilling på stedet.

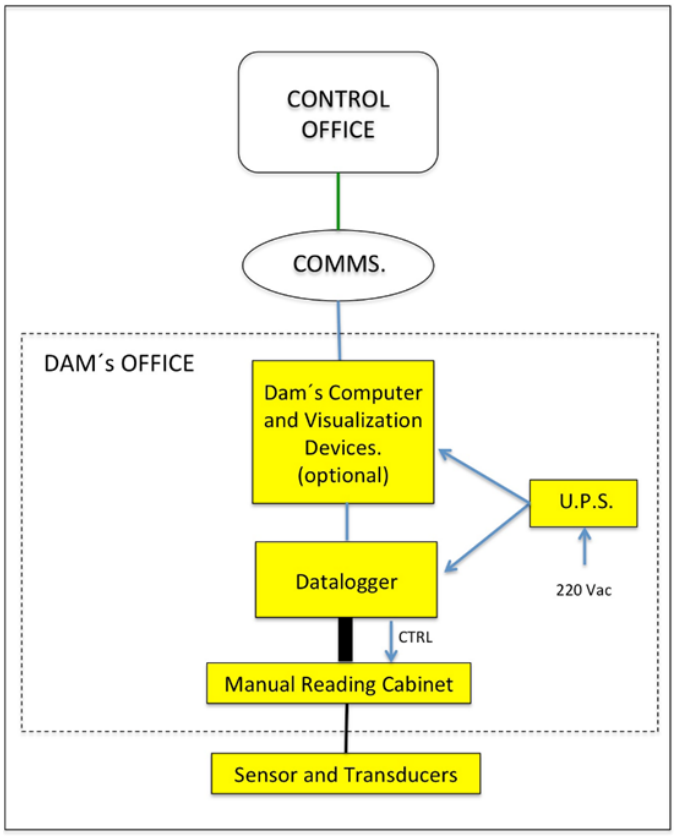
Fordelen med et sentralisert system er at det er en enkel løsning som er nyttig på grunn av følgende forhold:

- Mindre utstyr og lavere kostnader.
- Mer pålitelig ved enkel overvåking.
- Små vedlikeholdskrav ved enkel overvåking.

Et sentralisert system er derfor mer egnet under følgende forhold:

- Ikke nødvendig med dataoverføring i sann tid.
- Ved relativt lite behov for måleinstrumenter.
- Måleinstrumentene er ikke langt unna (<500 m) stedet hvor informasjon samles.

Det bør bemerkes at signalet overføres gjennom metallkabler. Systemets følsomhet for induserte elektriske svingninger kan øke betydelig med avstand. Videre er det vanlig praksis å installere et UPS-system (Uninterruptible Power Supply) som garanterer tilførsel av strøm på til enheten hvis nettet faller ut. Norsk regelverk (dsf. § 7-2) krever at systemet for overføring av måleverdier skal være sikret mot funksjonssvikt. Dette krever at det må gjøres vurderinger i hvert enkelt tilfelle av om hva som kan forårsake svikt, og hvilke tiltak som skal forhindre svikt.



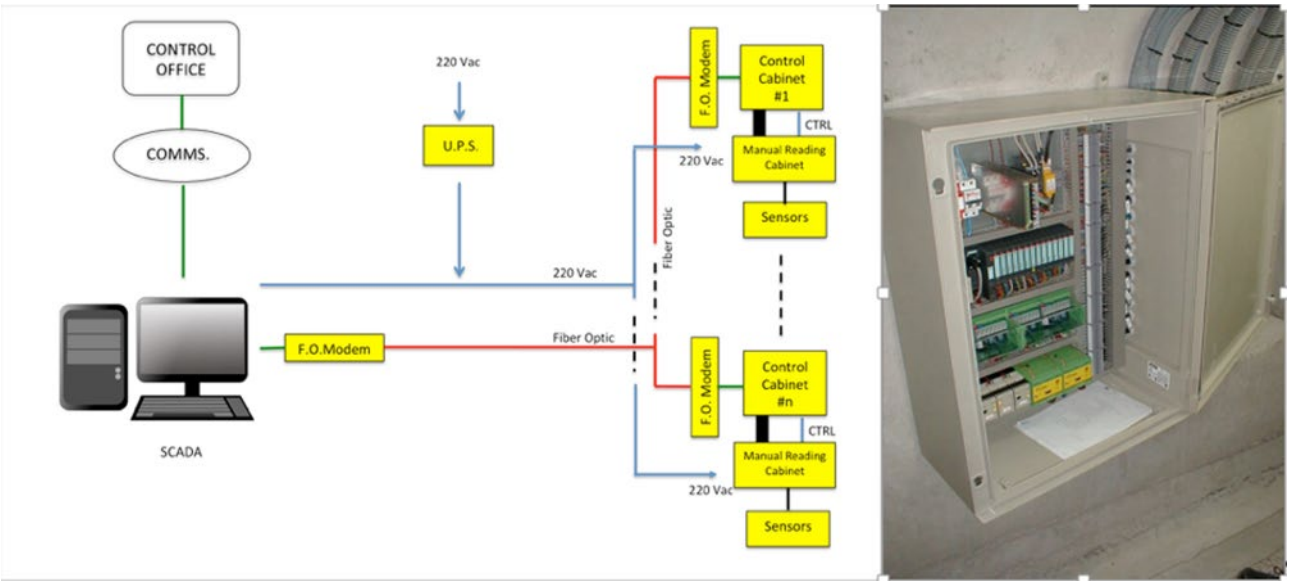
Figur 10 Bestanddeler av et sentralisert system

4.4.2 Distribuerte systemer

Når avstanden mellom sensorene er for stor, bør et distribuert system vurderes i stedet for et sentralisert systemet. Elementer som utgjør et distribuert system er vist nedenfor på Figur 11 og kan beskrives på følgende måte:

- Et nettverk av sensorer og transdusere som omgjør variasjoner i fysiske parametere til elektriske signaler fordelt i damkroppen
- Et sett med manuelle avlesningsbokser for å samle signalene fra sensorene på deres lokasjon
- Et sett med kontrollskap (Figur 11) som mottar signalene fra lokale manuelle avlesningsbokser, utfører automatisk avlesing, behandler og lagrer dataene og til slutt overfører de til kontrollsenteret
- Et lokalt kommunikasjonsnettverk mellom kontrollskapene og kontrollsenteret
- Eventuelt, kan en datamaskin på samme kontor som brukes som SCADA datamaskin også nyttes for data presentasjon og rapportfremstilling på stedet.

Som angitt ovenfor er distribuerte systemer den vanligste løsningen for automatisering av overvåkning av store dammer.

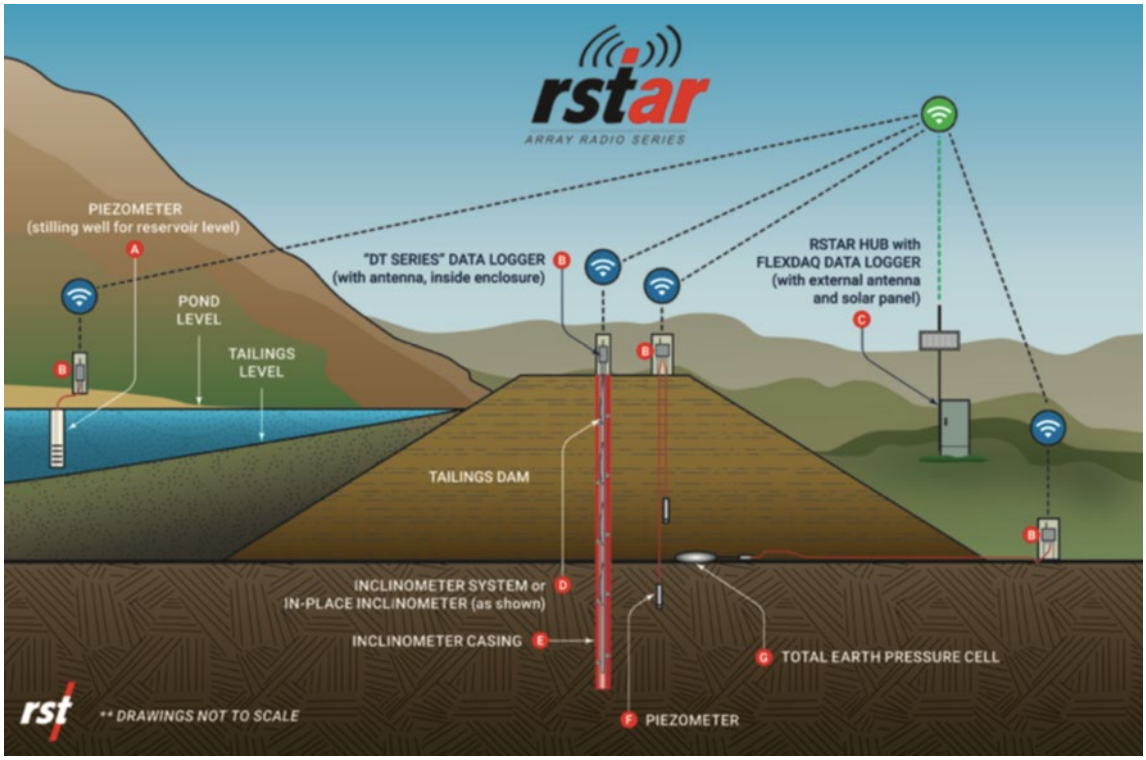


Figur 11 Elementer som inngår i et distribuert system (til venstre), bilde av et kontrollskap (til høyre)

De viktigste fordelene med et distribuert system er som følger:

- Betydelig reduserte kostnader og kompleksitet ved at omfanget av elektriske ledninger og trekkerør mellom sensorene og DAS reduseres
- Forbedrer påliteligheten i forhold til signaltap, elektrisk støy og beskyttelse mot induserte strømmer
- Bedre kontroll på dataavlesningskvalitet
- Forenklet vedlikeholdet av komplekse overvåkningssystemer

Vanligvis består det lokale nettverket til et distribuert system av en fiberoptisk ledning som gjør det mulig å dekke lange avstander uten å øke risikoen knyttet til overspenning indusert av atmosfæriske utladninger. Andre alternativer er trådløse nettverk basert på Wifi-, Bluetooth-, Zigbee- eller LoRa-teknologier. Med et trådløse nettverk kan det bygges forskjellige nettverkstopologier som punkt-til-punkt, stjerne eller mesh-topologier.



Figur 12 Typisk distribuert kommunikasjonssystem etter RST. A, D, E; F og G er forskjellige typer sensorer, B er kontrollskapet, C er kontrollskapet med DAS som kobles trådløst til kontrollsenteret drevet av et solcellepanel [19]

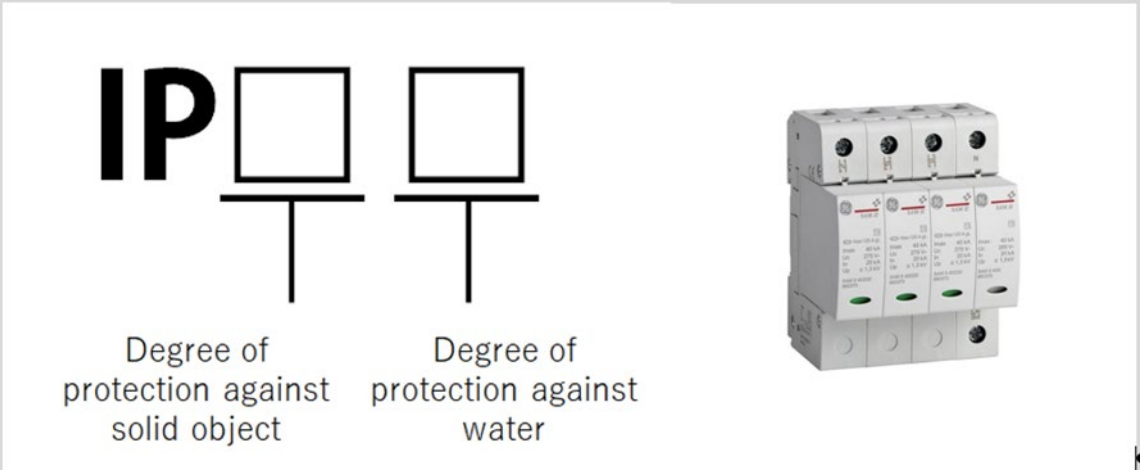
En vanlig løsning er at DAS ender opp med en forbindelse via kommunikasjonssystemet som er tilgjengelig ved dammen for å etablere en kobling til kontrollsenteret ("driftssentralen") sentralt, for eksempel via en trådløs tilkobling eller via en fiberoptisk ledning eller GPRS / 3G (*Figur 12*).

Det er også praktisk å installere et avbruddsfritt strømforsyningssystem (UPS) som garanterer tilførsel av strøm på installasjonsstedet. På denne måten vil DAS opprettholde sin normale drift selv ved midlertidige strømbrudd.

4.4.3 Pålitelighet

Beskyttelsen av utstyr og apparater mot vann eller støv er klassifisert i henhold til en retningslinje fra Den Internasjonale Elektrotekniske Kommisjon (IEC) kalt Ingress Protection Code (IP code) som illustrert på *Figur 13*. IP-koden består av de to bokstavene (IP) og to sifre. Det første sifferet rangeres på en skala fra 0 til 6 og angir graden av beskyttelse mot faste partikler, vanligvis støv. Den andre rangeres på en skala fra 0 til 8 angir graden av beskyttelse mot vanninntrenging.

For elektronisk utstyr som tilhører det automatiske overvåkingssystemet er det et krav at må de beskyttes av et kabinett med minst en IP 66-kode eller høyere når de er lokalisert utendørs eller i f.eks. en tunnel, inspeksjonsgalleri eller uoppvarmet lukehus. Dette beskyttelsesnivået garanterer at de elektroniske enhetene er fullstendig isolert og beskyttet mot støv og vanninntrenging.



Figur 13 Ingress Protection Code (IP code) (venstre) og galvaniske isolasjonselementer (høyre)

4.4.4 Miljøforhold

Den viktigste miljøbelastning er arbeidstemperaturen for de elektroniske enhetene. I Norge kan overflatetemperaturen bli så lav som -50 ° C om vinteren. Om sommeren kan temperaturen bli over 50 ° C for elektrisk metallutstyr som er direkte utsatt for sol. Det bør nevnes at enheter som er nedgravde i jord, satt inn i konstruksjoner eller plassert under vann er mindre utsatt for ekstreme temperaturer og miljøtilstander.

Arbeidstemperaturen for det vanlige kommersielle utstyret som brukes til det automatiske dam-overvåkingssystemer ligger i området fra 0 til 70 °C. Det anbefales å sjekke utstyrets spesifiserte arbeidstemperatur mot temperaturer i det nordiske klimaet. For noen typer utstyr som er plassert utendørs, for eksempel meteorologiske stasjoner, dataloggere, antenner og så videre, kan et spesifisert arbeidstemperaturområde fra -40 til 85 °C være nødvendig.

4.5 Ingeniørers kompetanse angående instrumentering

Spesialkompetanse er nødvendig for drift og vedlikehold!

Dameiere bør være klar over at det kreves spesiell kompetanse for å drifte og vedlikeholde et fungerende damovervåkingssystem. Som diskutert i kapittel 3, er systemer basert på manuelle avlesninger i prinsippet lettere å vedlikeholde enn automatiserte systemer.

En dameier bør kunne foreta manuelle avlesninger av sensorer, hente data fra automatiserte systemer og forstå hvordan man primært skal tolke data. Kunnskap om grunnleggende forebyggende vedlikeholdsarbeid er nyttig for ikke å gjøre seg avhengig av eksterne aktører som produsenter eller leverandører, da disse ikke alltid kan være lett tilgjengelige. Korrigerende vedlikeholdsarbeid utføres ofte av eksterne selskaper eller produsenter.

Til vanlig vedlikeholdsarbeid kreves det en elektriker eller elektroniker. Selv om det ikke dreier seg om et automatisert system, er mange av sensorene elektriske sensorer som er plassert i sentrale skap. "Teknikeren" skal kunne gjennomgå og reparere kabler, koblingsbokser og strømforsyning. Reparasjon av en elektrisk sensor skal utføres av produsenten.

Automatiserte systemer er mer krevende

Det krever mer detaljert kunnskap for å installere og vedlikeholde enheter og kommunikasjonsnettverk for de automatiske systemene. Noen automatiserte løsninger er lukkede systemer som bare kan vedlikeholdes av produsenten. Et åpent system kan repareres av en erfaren elektriker eller kommunikasjons- og automatiseringsekspert som tilhører vedlikeholdsteamet til dameieren eller kommer fra et spesialisert eksternt selskap. Kunnskap om programmering av dataloggere kan være nyttig, men ettersom dette svært sjelden er påkrevd, blir dette i hovedsak gjort av eksterne selskaper.

Bakkekontakt er viktig

Ingeniøren som tolker overvåkningsdataene bør ha en helhetsvisjon av stabiliteten til dammen og hvordan den oppfører seg. Videre bør han eller hun ha grunnleggende kunnskap for å kunne skille mellom data for unormal og normal oppførsel av dammen.

Like viktig er det at den personen som utfører tilsyn, kontroll og vedlikehold på stedet forholder seg kritisk til instrumentene – ikke bare sjekke om de virker, men også om de registrerer riktig.

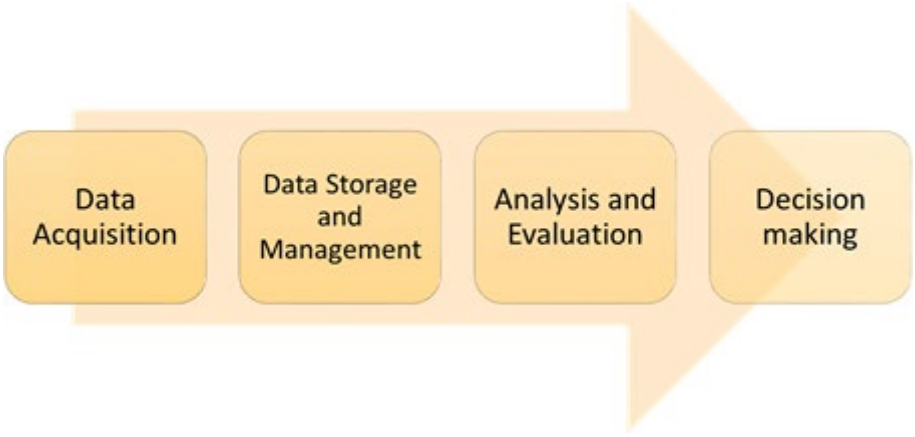
5 Datainnsamling og -håndtering

5.1 Innledning

Digitaliseringen av den private sfære og industrien har gått veldig raskt det siste tiåret. Når det gjelder drift, er Asset Management en vanlig måte å beskrive styring av det arbeidet som gjøres i driftsfasen. Med hensyn til dammer, inkluderer dette ikke bare vedlikeholdsarbeider og driftsprosedyrer, men også styring og overvåking av damsikkerhet på grunn av den potensielt høye risikoen dammer representerer.

Som nevnt i kapittel 3 utgjør damovervåkingen en viktig del av rammeverket for damsikkerhet. Damovervåking skal redusere risiko og muliggjøre tidlig identifisering av forhold som kan bidra til å redusere sannsynligheten for uønskede hendelser som kan forårsake svikt (forenklet etter ICOLD, 2008). På grunn av aldrende dammer over hele verden, befolkningsøkning og økende krav til åpenhet, er det behov for stadig tettere overvåking. Dette kan omfatte automatisering, telemetri og informasjonsteknologi. Som et svar, har dameiere en tendens til gradvis å redusere sine ikke-spesialiserte ansatte på stedet og sentralisere sin tekniske kunnskap.

Likevel vil ikke et perfekt fungerende overvåkningssystem nødvendigvis redusere risikoen hvis dataene ikke evalueres med jevne mellomrom og brukes til styring av damsikkerhet (dsf. tabell 7-2.1 krever bl.a. at vurdering av overvåkingsbehov og -resultater skal inngå i hovedtilsyn). Derfor er det viktig å opprette en effektiv kopling mellom datainnsamling, evaluering og beslutningstaking (Figur 14). Hensikten er å omdanne rå overvåkningsdata til verdifull informasjon, for å gi operatøren klar kunnskap om dammen og tilstanden til overvåkningssystemet.



Figur 14 Overvåkningsoppgaver fra datainnsamling til beslutningstaking

Mange dameiere er avhengige av ad-hoc-løsninger for dataanalyse, for eksempel regneark med manuell datainntastning. Imidlertid kan en sentralisert database med spesifikke overvåkingsfunksjoner bidra til å strømlinjeforme disse oppgavene, spesielt i store damporteføljer utstyrt med telemetrisystemer, hvor store datamengder kan gjøre analysen ineffektiv og tidkrevende. Det kan også muliggjøre at analyseoppgaver for geografisk spredte porteføljer kan bli sentralisert i ett enkelt teknisk kontor. Spesielt fremskritt innen informasjonsteknologi i løpet av det siste tiåret gir helt nye muligheter for å håndtere overvåkningsdata.

Funksjoner som gjør at dataovervåkingssystemer for dammer er nyttige for beslutningstaking inkluderer:

- Direkte kommunikasjon med telemetrisystemer, effektivisering av anskaffelsesprosessen og opprettholde sanntidsfunksjoner

- Å holde data oppdatert og lett tilgjengelig for alle interessenter i en potensiell database
- Innebygde verktøy for periodisk datavalidering og karantene, slik at overvåkningssystemets tilstand kan verifiseres
- Innebygde verktøy for å analysere store datamengder, med fokus på *kryssreferanser*, *korrelasjonsanalyse* og *tidlig oppdagelse av feilmodushendelser*

Et eksempel: I Spania implementerte en stor dameier et integrert overvåkningsverktøy for å forbedre damsikkerheten og rapporteringen betraktelig for mer enn 50 dammer. For tiden har mer enn 100 ingeniører, teknikere og annet personell som er involvert i damsikkerhetsprogrammet til dameieren tilgang til dataene. I løpet av de siste 6 årene er mer enn 300 årlige og 50 ekstraordinære rapporter utarbeidet med programvaren på en mer effektiv og detaljert måte.

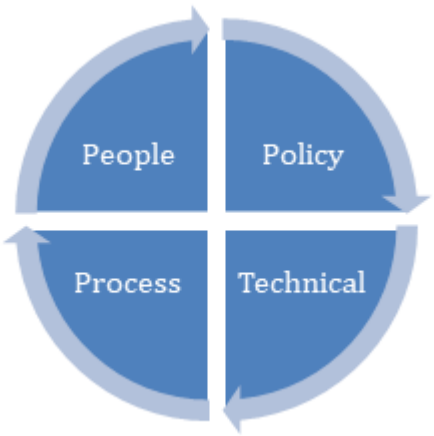
I tillegg hadde både dameieren og eksterne eksperter etter en seismisk hendelse umiddelbar og enkel tilgang til oppdaterte data for alle berørte dammer og kunne ta beslutninger om tiltakene som måtte iverksettes. Samme dag kunne alle unormale data (avvik) og overskridelse av terskelverdier som ble oppdaget gjennom det automatiske datainnsamlingssystemet bli vurdert fra hvilken som helst datamaskin med internettilgang. Dagen etter gjorde dameierens teknikere manuelle tilleggsavlesninger og lastet opp data om morgenen. I samme øyeblikk var oppdaterte diagrammer over alle overvåkningsdata fra dammene tilgjengelig for utarbeidelse av en detaljert tilleggsrapport ("spesielt tilsyn") til rett tid.

5.2 Beslutningsprosesser og systemintegrasjon for dameier

5.2.1 Beslutningstaking

Som nevnt over, kan omfanget av et overvåkningsverktøy være veldig bredt. Desto høyere integrasjon i andre systemer og jo flere tilgjengelige funksjoner, jo høyere er fordelen med å overvåke data. Likevel kan for komplekse systemer også virke mot sin hensikt hvis de ikke fungerer som de skal og forårsaker unødvendige kostnader og innsats fra alle interessenter, noe som kan føre til demotivasjon og at prosjektet slår feil.

Når det gjelder dameieren, kan de viktigste aspektene ved beslutningsgrunnlaget for utforming og implementering av overvåkningsinstrumenter klassifiseres i Retningslinjer (policy), tekniske aspekter, prosess og mennesker (Figur 15).



Figur 15 Viktige aspekter som skal tas i betraktning for beslutning om utforming og bruk av overvåkningsinstrumenter

Retningslinjer (policy) omhandler juridiske forhold og forholdet til andre interessenter (interessehavere). Den gjeldende lovgivningen om damsikkerhet må alltid tas i betraktning for å identifisere forpliktelsene til dameieren med hensyn til damovervåking.

Tekniske aspekter refererer seg til de tekniske kravene til overvåkningsstyringsverktøyet. Dette er ikke bare krav fra sluttbrukeren til databehandling og evaluering, men også IT-krav til sikkerhet og protokoller. Også mengden dammer og andre overvåkede anlegg, samt typen eksisterende overvåking og automatiserte datainnsamlingssystemer, bestemmer kravene til verktøyets karakteristikker og egenskaper.

Prosess beskriver arbeidsprosessene og informasjonsflyten som bør dekkes av overvåkningsverktøyet. Hvor langt skal allerede etablerte arbeidsprosedyrer dekkes, kontrolleres eller erstattes av et automatisert verktøy.

Mennesker vurderer de personlige kravene for hver bruker (eksempelvis VTA, damvokter - driftspersonell, rådgivere) og tar hensyn til ansvar, ferdigheter og arbeidsfelt. Dette er viktige aspekter for vellykket bruk av et overvåkningsverktøy.

Dessuten kan det tilgjengelige budsjettet være den avgjørende faktoren for å fastsette krav til et dataovervåkningsverktøy for damovervåking. Derfor er det ofte vanlig å bruke vanlige regneark. Dette kan være tilstrekkelig for små dammer, men når man håndterer en større datamengde (stort antall sensorer og / eller lange tidsserier), kan dette bli lite effektivt, spesielt når datatolkning gjøres med jevne mellomrom og diagrammer må tilpasses manuelt for hver rapport.

5.2.2 Integrering med annen programvare

Som nevnt ovenfor, skal overvåkning av dam og datahåndtering integreres i styringssystemet for damsikkerhet hos dameieren.

Imidlertid varierer omfanget og egenskapene av programvaren for damovervåking vanligvis med kravene som hver dameier stiller. Disse avhenger av etablerte arbeidsprosedyrer og annen programvare og databaser som allerede er tatt i bruk. I avsnitt 5.4 blir det gjort rede for en rekke funksjoner som enten kan være en del av overvåkningsverktøyet eller en annen programvare.

Overvåkningsverktøyene kan være delvis eller fullstendig integrert i datahåndteringsprogramvaren. Det er viktig at hver programvareutvikler klargjør dataformat, slik at dataene hentet fra overvåkningsverktøyene kan integreres med datastyringsprogramvaren.

Når det gjelder datatypen, er automatiserte data om magasinvannstand eller meteorologiske data noen ganger allerede tilgjengelige i andre databaser som brukes til styring av vannkraftproduksjon eller flomvarsling. Denne informasjonen er nødvendig og bør integreres hvis den ikke er tilgjengelig på andre måter.[2]

Noen dameiere har et nødsystem for forskjellige typer hendelser og alarmer. I dette tilfellet er det nyttig å integrere damovervåkingssystemet med den eksisterende infrastrukturen for å overføre alarmer som utløses fra overvåkningssensorer til det systemet.

Noen land krever installasjon av et kontrollsenter for beredskapsplaner som har sin egen programvare. Ettersom overvåkningsdata er en viktig indikator for å oppdage nødsituasjoner, bør informasjon om alarmutløsing deles.

Noen selskaper har et Asset Management-verktøy for styring av vedlikeholdsarbeid og andre oppgaver angående infrastrukturen deres. Integrasjonen mellom overvåkningsdataene og Asset Management-verktøyet kan også være nødvendig, men bør vurderes kritisk for ikke å "overbelaste" noen av systemene, jf. innledningen til dette underkapittelet.

5.3 Prosess for å etablere et overordnet datahåndteringsverktøy

Implementeringen av et dataadministrasjonsverktøy er mer enn kjøp av en programvarelisens. Ettersom det involverer mange interessenter, bør det være godt planlagt (Figur 16). Spesielt i store selskaper med spesifikke retningslinjer og forskrifter, må implementeringen av ny programvare være godt planlagt ettersom visse prosedyrer og ansvarsområder må tas med i betraktningen.

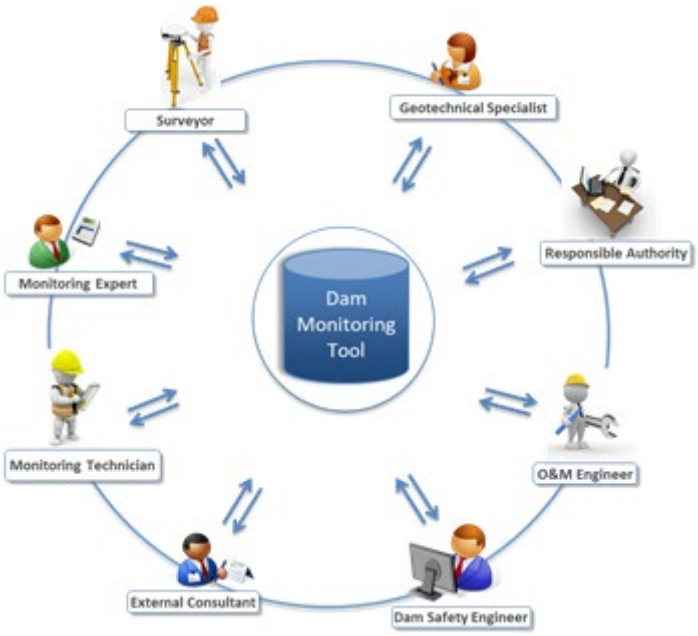
Det bør være et samarbeid mellom IT-eksperter og eksperter på dam og overvåking, fordi hver av disse har forskjellige krav og ansvar. Det viktigste aspektet for en vellykket implementeringsprosess er sluttbrukerens aksept av programvaren.

Derfor bør brukerne være involvert under hele implementeringsprosessen. Denne prosessen kan deles inn i følgende faser:

- Utvikling og anskaffelser
- Konfigurasjon
- Oppstart

En perfekt fungerende programvare som ikke er brukervennlig eller som ikke støtter teknikere og ingeniører i å utføre sine overvåkningsoppgaver, vil ikke bli brukt.

[2] Her kan det legges til at mye verdifull informasjonen kan finnes hos andre dameiere, spesielt hvis det dreier seg om en lengre elvestrekning eller større nedslagsfelt. Virkemåten til norske brukseierforeninger og liknende organisasjoner er dog utenfor denne rapportens mandat.



Figur 16 Interessenter i forbindelse med damovervåking

Det bør også vurderes å implementere verktøyet gradvis. Dette kan gjøres ved i begynnelsen bare å innlemme de grunnleggende funksjonene i verktøyet, slik at brukeren kan begynne å jobbe og bli kjent med dem og ikke vil bli overveldet av for mange endringer og funksjonaliteter.

For dameiere som driver et stort antall dammer anbefales det dessuten å starte med noen få anlegg og gradvis innlemme resten av dem. På denne måten kan systemet testes på en liten gruppe brukere, kanskje de som er mindre tilbakeholdne når det gjelder endringer. Erfaringene som blir gjort vil bidra til å optimalisere implementeringen for resten av dammene.

For å foregripe de neste kapitlene, bør følgende aspekter tas med i betraktning for en vellykket implementering av et overvåkningsverktøy:

- Involver alle interessenter, inkludert ingeniører, teknikere og IT-eksperter.
- Definer kravene til “må ha” og “kjekt å ha”. Ikke fokuser bare på funksjoner, men også på hvordan du bruker dem til databehandling, damsikkerhet- og tilstandsvurdering og rapportering.
- Sammenfatt og konsolider oppdatert informasjon om det installerte overvåkingssystemet.
- En riktig konfigurasjon av verktøyet er ikke bare programvare, men krever kunnskap om overvåking og damsikkerhet.
- Ta i betraktning opplæring og tilpasningstid av den som skal bruke programvaren og systemet under implementeringsprosessen.

5.3.1 Utvikling og anskaffelser

Utvikling, anskaffelse og installasjon av et styringsverktøy for damovervåking utgjøres i hovedsak av "informatikk" -delen av implementeringsprosessen. Denne fasen skal imidlertid ikke bare administreres av IT-eksperter. Erfaringene og innspillene fra eksperter på damsikkerhet og damovervåking er avgjørende for et vellykket prosjekt. Dette gjelder både dameieren og leverandøren av programvareverktøyet. Derfor er det viktig å inkludere spesifikk kompetanse og

kunnskap med hensyn til damovervåking (ikke bare tilstandsovervåking av anlegget), instrumentering, automatiseringssystemer, analyse av damovervåking og damsikkerhet.

Dameier kan velge å kjøpe eller å utvikle sin egen programvare. Med dagens modne marked, anbefales det å kjøpe eksisterende kommersiell programvare tilgjengelig på markedet med ønskede tjenester for å unngå unødig risiko under programvareutviklingen.

Når en bestemmer seg for å kjøpe en eksisterende programvare, sparer dameieren mye tid og vet nøyaktig hva man får for pengene sine. Dette gjelder spesielt hvis en programvare allerede brukes i andre damprosjekter. I tillegg er det en god strategi å etablere et lite pilotprosjekt for testing med et begrenset budsjett.

Programvaren kan installeres på en *skyserver*, på en *sentral server* hos dameieren og / eller direkte på *brukerens datamaskin*. Spesielt installasjonen på den sentrale serveren til dameieren må ikke undervurderes, fordi kompatibiliteten med systemprogramvaren må garanteres og sikkerhetskrav, installasjons prosedyrer og tilgangspolitikk for eksterne selskaper må tas i betraktning og respekteres.

Installasjonen på en skyserver er enklere og gir mer fleksibilitet, ikke bare under installasjonsprosessen, men også under vedlikehold og drift. Likevel må skyserveren oppfylle dameierens krav, spesielt når det gjelder ytelse og sikkerhet.

I Tabell 2 nedenfor vises et utvalg av forskjellige tilgjengelige programvareløsninger. Noen av dem kan bare brukes til visse typer sensorer eller produsenter. Mange er designet for overvåking generelt, og andre er mer fokusert på spesifikke krav til damovervåking.

Tabell 2 Et utvalg av forskjellige leverandører og programvareløsninger

PROGRAMVARE	LEVERANDØR
ARGUS	Soil Instruments, Storbritannia
ATLAS	Slope Indicator Co, Mukilteo, WA, USA
AvaNet	AVA Monitoring AB, Göteborg, Sverige
Cautus Web	Cautus Geo, 3400 Lier, Norge
Conwide	Conwide AB, Fagerhult, Sverige
DamData	Ofiteco, Spania
DamSmart	AECOM
GEOSCOPE	Sixense-Soldata, Frankrike
GeoViewer	RST Instruments, Coquitlam, BC, Canada
GKS Pro	GGB, Tyskland
HoleBASE	Keynetix Ltd., Redditch, Storbritannia
HYDSTRA	Kisters AG, Tyskland
Intellidam	GlobVision Inc, Canada
iSiteCentral	Geocomp Corporation, Acton, MA, USA
ISY JobTech	Norconsult, Norge
Konect GDS	Campbell Scientific
MissionOS	Maxwell Geosystems, Hong Kong
MLSuite	Canary Systems Inc., New London, NH, USA
SDC	Glötzl, Tyskland
TerrWeb	Encardio Rite, India
Trimble 4D	Trimble, USA
Vista Data Vision	Vista Engineering, Reykjavik, Island
WebDavis	Solexperts
WMS	Sisgeo, Italia

På grunn av mangfoldet av programvareverktøy og det faktum at mange er under kontinuerlig oppdatering, inkluderer ikke denne rapporten en sammenligning av tilgjengelige løsninger. Det er ofte bare utvikleren som kjenner hele potensialet til produktet sitt, og informasjon om kommersielt materiale kan være villedende.

5.3.2 Konfigurasjon

Så snart programvaren er utviklet eller kjøpt, må den konfigureres i henhold til den enkelte damanlegg og det installerte overvåkningssystemet (Figur 17).

Konfigurasjonen inkluderer en oversikt over det installerte overvåkingssystemet som er konfigurasjonen (oppsettet) av alle sensorer med tilhørende identifikasjonskode. Omfanget av ytterligere konfigurasjoner avhenger hovedsakelig av de tilgjengelige funksjonene i programvareverktøyet. Dette kan dreie seg om inkludering av formler for beregning av bestemte tekniske verdier, forhåndskonfigurasjon av diagrammer og skjermer, opplasting av historiske overvåkningsdata og definisjon av terskel- og utløserverdier.

Uansett krever konfigurasjonen ekspertise innen damovervåking, spesielt med hensyn til eksperter på behandling, gjennomgang, beregning og analyse av damovervåkingsdata. Det handler ikke bare om å konfigurere tall, men å forstå tilgjengelig informasjon og behandle og presentere data på den måten brukerne (eksempelvis VTA, damvokter - driftspersonell, rådgiver) krever.

Når det gjelder konfigurasjonen for beregning av tekniske data og verdier, spesielt i eldre dammer som en har lite dokumentasjon og tekniske data på, krever denne oppgaven ofte undersøkelser og søk etter opprinnelige utgangsverdier og mål (f.eks. høyde på tetningskjerner i fyllingsdam), materialegenskaper og –parametere.

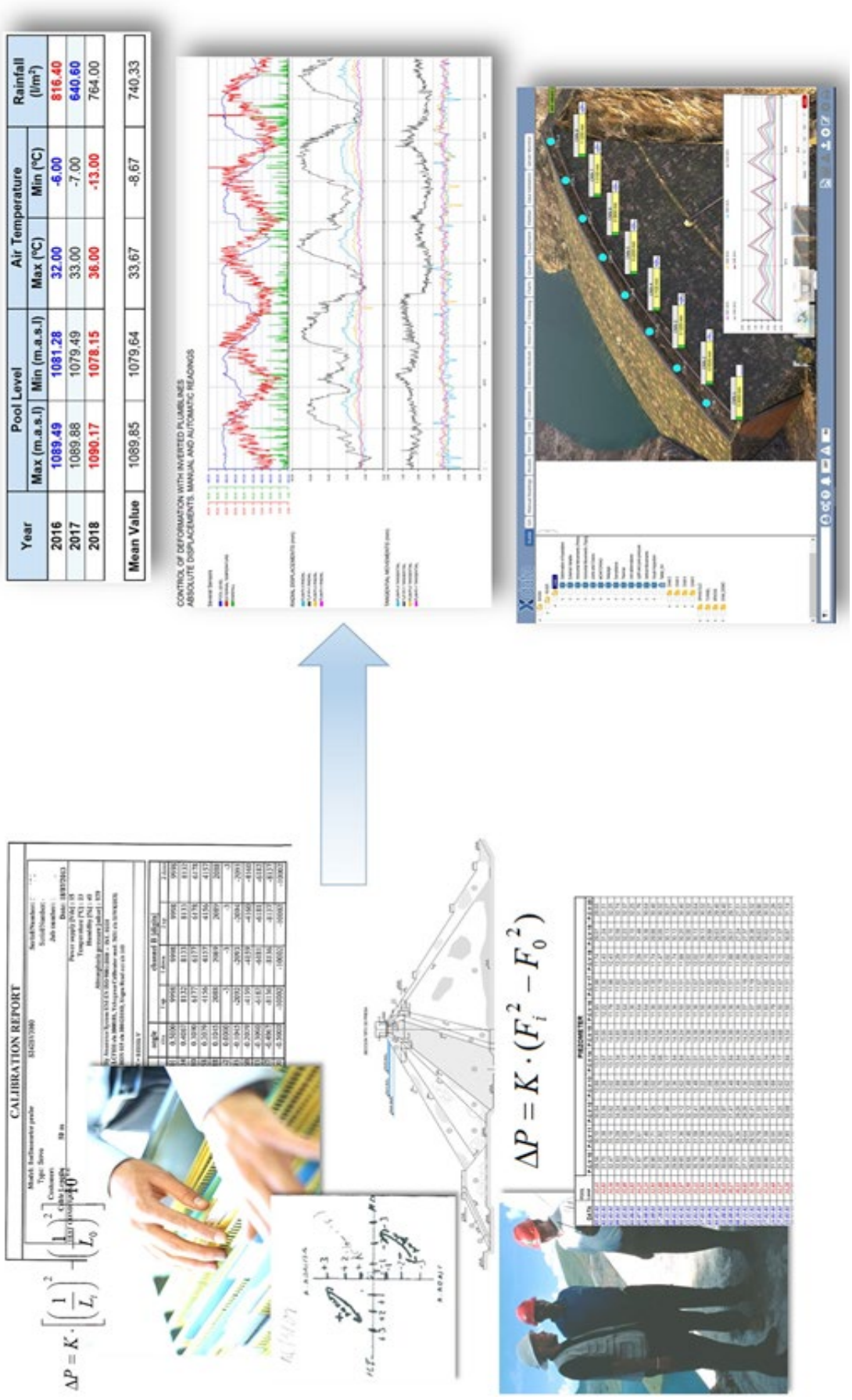
Oppsummert er konfigurasjonsprosessen en viktig fase under implementeringen av verktøyet for data og damovervåking og bør derfor ikke undervurderes. Dette kan sees som ingeniørdelen av oppgaven og skal gjenspeile riktig installert overvåkingssystem. Selv om det avhenger av funksjonene i programvaren, er det viktig å finjustere utformingen av grensesnittene for å tolke data. Derfor er teknisk kunnskap innen damsikkerhet og damovervåking uunnværlig for konfigurasjonen av dette verktøyet.

5.3.3 Oppstart av systemet

Etter endt konfigurasjon av systemet, kan det tas i bruk. Oppstartsfasen skiller seg fra bruksfasen, er en del av implementeringsprosessen og dreier seg om riktig drift og vedlikehold av verktøyet.

Opplæring av personell som skal bruke programvareverktøyet er det viktigste kriteriet for en vellykket implementering av styringsverktøyet for damovervåking. Bare hvis brukeren forstår de forskjellige funksjonene i programvaren og kan bruke dem effektivt, vil vedkommende ta dem i bruk. *En perfekt fungerende programvare som ikke brukes av de forskjellige interessentene, er en feilslått programvare.*

Implementeringen av et nytt programvareverktøy innebærer alltid en endring i arbeidsatferd og læring. Den menneskelige motstanden mot endringer skal ikke undervurderes. Derfor bør opplæringen ikke bare inkludere en forklaring av de forskjellige funksjonene i programvaren, men også en motivasjon for å bruke den. Fordelene ved å bruke verktøyet og fordelen med damovervåking bør fremheves.



Figur 17 Gjennomgang av informasjon for konfigurasjon av formler, historiske data, tegninger, tabeller etc.

Etter en vellykket implementering begynner drifts- og vedlikeholdsfasen. Omfanget av drifts og vedlikeholdsarbeidet avhenger av hvert programvareverktøy og den installerte løsningen; det vil si, om det er en skyløsning eller installert på serveren til dameieren. Hvis leverandøren har fjerntilgangstillatelse til programvaren, kan periodiske oppdaterings- og vedlikeholdsarbeider gjøres lettere.

5.4 Funksjoner

Det finnes et bredt spekter av funksjoner som allerede tilbys i eksisterende programvareverktøy, og mange flere mulige tilleggsfunksjoner som teknisk også kan integreres. Eieren av anleggene bør definere sine prioriteringer og skille mellom "kjekt å ha" og "må ha"-funksjoner.

I dette kapittelet blir de viktigste funksjonene beskrevet. Rapporten skiller mellom følgende typer funksjoner som blir behandlet i dette og de to neste kapitlene:

- Generelle funksjoner
- Datapresentasjon
- Tilleggsfunksjoner

5.4.1 Database og maskinvare

Kapasiteten til databasen skal være tilstrekkelig for å håndtere forventede datamengder og alle automatiserte prosesser. Med moderne teknologi er dette vanligvis ikke noe stort problem, men det bør tas i betraktning hvis det dreier seg om å håndtere svært lange tidsserier av data, et stort antall sensorer og flere dammer. Dette gjelder også den nødvendige maskinvaren.

5.4.2 Sensorer

Dammer inkluderer vanligvis instrumentering fra forskjellige produsenter med ulike typer av signaler, for eksempel frekvens, spenning, motstand eller strøm som blir konvertert til et digitalt format. Hver dataavlesning må knyttes til en bestemt tidsangivelse. Avhengig av lesehyppighet har de fleste sensorer en registrering per måned, uke eller dag og i noen tilfeller hver time eller hvert kvarter. De fleste instrumenterte dammer (internasjonalt) har mellom 20 og 100 sensorer, men noen kan ha over 1000.

Derfor skal dataadministrasjonsverktøyet for dammer tilfredsstille følgende funksjonskrav:

- Kunne behandle signaler fra forskjellige sensorer.
- Det skal være enkelt å konfigurere eksisterende sensorer og nye sensorer når nødvendig.
- Mulighet for å lagre ekstra sensorinformasjon.

5.4.3 Beregning

Det må skilles mellom *rådata* levert av sensoren og *verdiene* som blir brukt for tolkning av hvordan dammen oppfører seg. For å fremstille de tekniske verdiene, bør overvåkningsverktøyet gjøre de nødvendige beregninger. Selv om beregninger kan gjøres før data lastes opp (de fleste automatiserte datainnsamlingssystemer (ADAS) beregner tekniske verdier og kan overføre dem til overvåkingsverktøyet eller manuelt avleste data blir konvertert av brukeren i feltet), anbefales det sterkt å lagre *både* rådata og tekniske verdier i databasen for å kunne revidere beregningene i ettertid, hvis nødvendig. Brukeren skal kunne ettergå formlene og parameterne som brukes i beregningene.

Tatt i betraktning en mulig oppgradering, endring eller reparasjon av overvåkningssystemet i fremtiden, skal brukeren kunne endre eksisterende formler eller sette opp nye beregningsformler.

5.4.4 Brukerprofiler

Som nevnt tidligere, skal ulike brukere kunne arbeide med databehandlingsverktøyet. Ettersom hver bruker har forskjellige oppgaver relatert til damovervåking, bør dette gjenspeiles i forskjellige brukerprofiler.

For eksempel kan en damvokter gjøre avlesninger på stedet og laste opp dataene til verktøyet. Vassdragsteknisk ansvarlig eller rådgiver gjennomgår data og beregninger og utfører tolkningen. Et system som brukes av flere brukere, skal kunne gi dem tilgang samtidig.

5.4.5 Datainnsamling

Datainnsamling av overvåkningsdata i damanlegg kan gjøres manuelt, eller automatisk hvis en har et automatisk datainnsamlingssystem. (Dette er mer utførlig behandlet i kapittel 4.) Et programvareverktøy bør utarbeides for å motta data på begge måter for å takle situasjoner som automatisk systemkontroll, og muligheten for at systemet er ute av drift, eller systemfeil. Videre er det nesten i alle dammer ekstra kontrollvariabler som ikke er automatiserte, for eksempel geodetisk kontroll eller inklinometre. Derfor skal et programvareverktøy kunne motta data fra forskjellige kilder.

Manuell datainnsamling kan gjøres ved hjelp av et brukergrensesnitt i applikasjonen der data kan skrives inn for hånd eller gjennom opplasting av filer.

Bruken av bærbare måleenheter utstyrt med datalagring, som direkte kan laste opp måleresultater til et arkiv, eller bruk av bærbare enheter (lap-top) som muliggjør registrering, umiddelbar validering av målte data (ved bruk av et manuelt måleutstyr) og direkte innmating av måledata til arkivet, gjør den manuelle operasjonen enklere og mer pålitelig [9].

I tillegg til bærbare måleenheter som brukes til måling av sensorer, tilbyr noen applikasjoner egen programvare for manuell datainnsamling som kan installeres på håndholdte enheter som mobiltelefoner eller nettbrett. Denne programvaren er synkronisert med databasen til programvareverktøyet og gjør det mulig å laste opp data i sanntid via nettet. Omvendt, på den annen side kan den også gi tilleggsinformasjon som er inkludert i den sentrale databasen, for eksempel grenseverdier eller historiske data, til personellet på stedet.

Hvis et automatisert datainnsamlingssystem (ADAS) er installert, kan disse dataene importeres direkte til datahåndteringssystemet for dammen. Derfor er det nødvendig med kommunikasjon mellom de forskjellige dataloggerne og programvaren. Hvis plasseringen av serveren for programvareverktøyet er på stedet, er det vanligvis nødvendig med en fast eller trådløs tilkobling til dataloggerne. Hvis verktøyet er installert på en sentral eller skyserver, vil internettforbindelse være nødvendig. I begge tilfeller må den tilsvarende protokollen for dataoverføring etableres.

5.4.6 Dataeksport

Selv om overvåkningsverktøyet inneholder (nesten) alle nødvendige funksjoner, er det nyttig å kunne eksportere data til andre databaser for etterbehandling. I noen tilfeller trenger andre eksperter, som ikke har eller ikke skal ha tilgang til verktøyet, overvåkningsdata. Mange brukere foretrekker å gjøre tilleggsberegning med andre kjente programmer som Excel.

Derfor bør verktøyet tillate å eksport av data til vanlige formater som *.csv eller *.xls.

5.4.7 Dataregistrering, validering og redigering (bearbeiding av resultater)

Brukeren skal kunne gjennomgå alle dataene som er lastet opp til overvåkningsverktøyet. Før en evaluerer dataene, bør en ingeniør/tekniker som har erfaring med overvåking verifisere både

manuelle og automatiserte data. Dette bør gjøres både for rådata og tekniske verdier. Selv om det er lettere med tekniske verdier med vanlige og kjente måleenheter, kan noen feilaktige data lettere identifiseres gjennom rådata, spesielt når det gjelder transponerte sifre.

Informasjon om data er validert eller ikke, bør registreres i systemet.

I en skreddersydd løsning kan firmaspesifikke arbeidsprosedyrer for dataregistrering, som involverer flere ansvarsnivåer, innarbeides før man definitivt validerer data.

I tillegg til å gjennomgå data, skal brukeren (eller et utvalg autoriserte brukere) kunne endre eller slette data. Spesielt ved manuell avlesning er visse feil ganske åpenbare og kan rettes. I alle tilfeller skal dette registreres i systemet.

Det er viktig å ta vare på validerte rådata, og det er viktig å dokumentere hva og hvorfor bearbeidede data er endret. Dette henger sammen med presentasjon av data, se avsnitt 5.5

5.4.8 Alarmering

Som angitt i kapittel 6.5, kan terskler (utløserverdier) for måleparametre defineres på mange forskjellige måter, avhengig av egenskapene til hver variabel. De enkleste og vanligste måtene er maksimums- og minimumsverdier, mens mer presise verdier avhenger av andre måleparametre, for eksempel temperatur eller magasinnivå (dynamiske terskelverdier). Derfor bør programvareverktøyet tilby fleksibiliteten til å integrere dem.

I noen tilfeller kan det være nødvendig å tilordne flere terskel- og utløserverdier til en sensor for å vurdere forskjellige alarmnivåer. Et første nivå kan være informativt, og følgende nivå genererer et varsel eller en alarm.

På grunn av at verdiene kan variere på grunn av sensorrekalibrering eller bare ved en oppdatering som bruker mer historiske data for en statistikkmodell, er det viktig at brukeren kan definere og endre verdiene som er konfigurert i systemet.

Nye måledata, både manuelle og automatiske data, skal sammenlignes automatisk med de angitte verdiene for å utløse tilsvarende varsler og / eller alarmer. Brukeren skal informeres av systemet om hver verdi som er overskredet. Dette kan gjøres gjennom grensesnittet ved å vise denne informasjonen om de tilsvarende sensorene på en tydelig og visuell måte, vanligvis med forskjellige farger eller lys.

Avhengig av ansvarsforholdene i et selskap, kan det være nødvendig å validere varsler og alarmer for å registrere at de er kontrollert av den ansvarlige.

Prosessen med videre oppfølging, tiltak, beredskap osv. drøftes ikke her.

5.4.9 Rapporter

Et verktøy for styring av damovervåking skal *ikke* automatisk generere en fullstendig sikkerhetsrapport for dammen. Dette krever en detaljert analyse av dataene gjort av en erfaren damsikkerhets- og overvåkingsekspert. Ikke desto mindre skal verktøyet bistå brukeren så langt som mulig ved å behandle og generere informasjonen som er nødvendig for evaluering. Spesielt repeterende og tidkrevende arbeid bør dekkes av verktøyet. Minimumskravene som skal inkluderes i en overvåkningsrapport avhenger av nasjonale forskrifter og retningslinjer og, i noen selskaper, av spesifikke selskapsbestemmelser (interne pålegg, avtaler med eksterne).

Den vanligste informasjonen som skal inkluderes er diagrammer og tabeller. Mer detaljert informasjon er tegninger kombinert med overvåkningsdata eller rapporter om alarmutløsing.

For å inkorporere denne informasjonen i overvåkningsrapporten, bør den enkelt eksporteres til jpeg- eller pdf-filer.

I det følgende kapittelet "Datapresentasjon" vises eksempler på diagrammer og tabeller som kan være del av en overvåkningsrapport.

5.5 Datapresentasjon

En god datapresentasjon er avgjørende for å lette tolkningen av hvordan et damanlegg oppfører seg. Det er nøkkelen for å omgjøre sensordata til nyttig informasjon. De fleste programvareverktøyene tilbyr en rekke typer diagrammer og "dashbord". Riktig presentasjon av data avhenger av sensorene og eksterne variabler som påvirker kontrollvariablene.

Presentasjonen skal bidra til å identifisere disse eksterne ytre effektene, sammenligne forskjellige sensorer med hverandre, filtrere ut for detaljerte data, oppdage anomal atferd eller feilaktige data og bidra til å forstå hvordan dammen oppfører seg.

Som allerede nevnt i avsnitt 5.3, er et kraftig verktøy som ikke er riktig konfigurert lite nyttig. Derfor bør en erfaren ekspert på damovervåking gi råd i forbindelse med presentasjonen av data. Det er særdeles viktig at en har bearbeidete og pålitelige data i en beredskapssituasjon.

I dette kapittelet gjennomgås de vanligste måtene å presentere overvåkingsdata på.

5.5.1 Generelle egenskaper for diagrammer

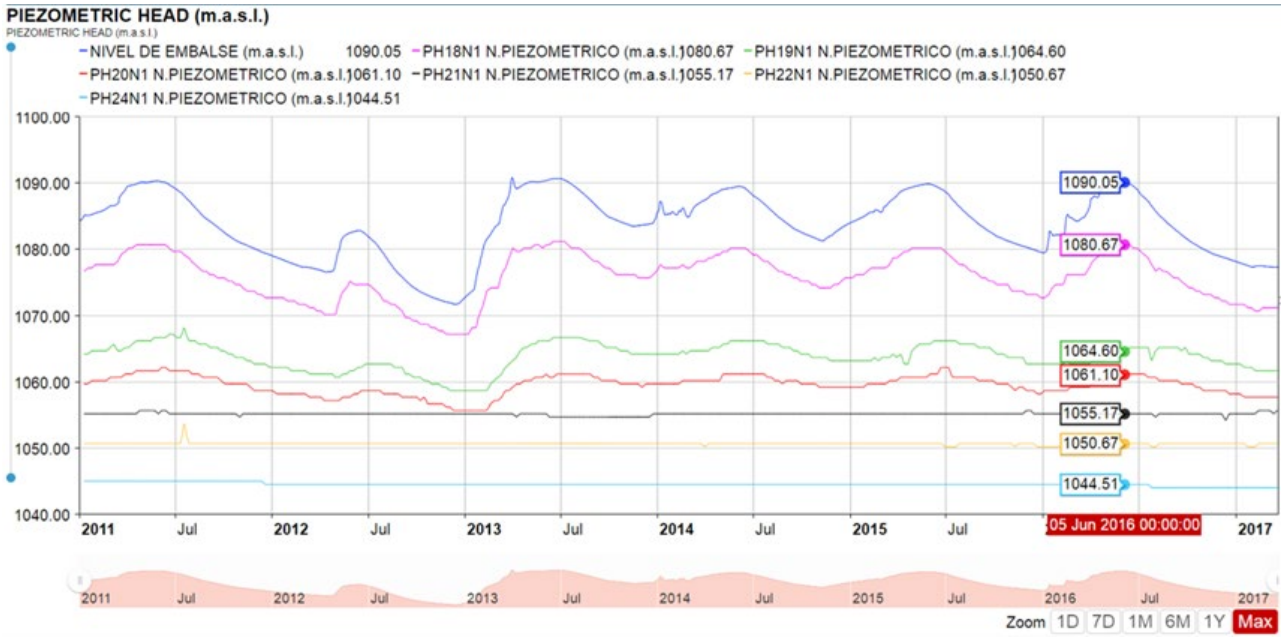
Noen programvareverktøy er begrenset til en enkel grafisk visualisering av tidsserier uten mulighet for endring. Dette kan være nyttig for en rask visning av utvalgte sensorer, fordi brukeren ikke trenger å konfigurere alle detaljene i diagrammet før vedkommende ser dataene. Programvaren velger automatisk skalaer, farger og andre egenskaper på diagrammet.

Hvis brukeren likevel ønsker å visualisere bestemte aspekter ved utviklingen av en eller flere variabler, trengs en manuell konfigurasjon eller endring av diagrammer. For eksempel kan en variasjon i noen få verdier endre skalaen betydelig, slik at andre variasjoner av større betydning ikke kan analyseres lenger. I dette tilfellet er en manuell modifisering av skalaen viktig for en detaljert analyse av hvordan dammen oppfører seg.

Grafiske verktøy for overvåking av data gir mange muligheter for en individuell konfigurering av diagrammer, men har også sine begrensninger. Excel-diagrammer inneholder mange funksjoner og høy fleksibilitet som mange brukere tar for gitt, men de fleste visualiseringsverktøy som er inkludert i overvåkingsprogramvare tilbyr ikke denne fleksibiliteten. Et eksempel vises i Figur 18.

De vanligste alternativene for å konfigurere diagrammer manuelt er:

- Farge, type og tykkelse på linjer
- Merking av avlesninger med prikker for å vise de nøyaktige leseverdiene
- Tilpasning av variablene som skal inkluderes i tegnforklaringen
- Minimum / maksimale verdier på akser og avstand mellom skillelinjer
- Legge til merknader og referanselinjer



Figur 18 Diagram som viser nivå på 5 piezometere avhengig av tid med nøyaktig måleverdier

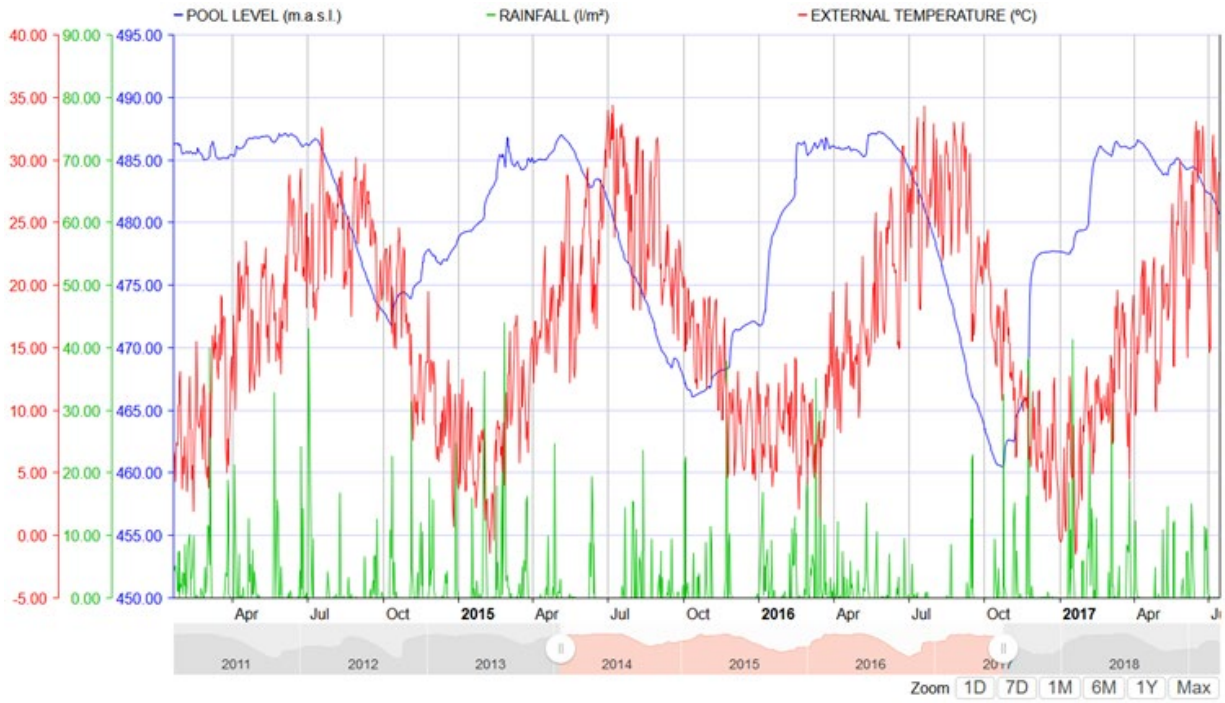
5.5.2 Tidsavhengighet

Den vanligste og enkleste måten å presentere data grafisk på er tidsgrafer som viser trender i variablene over tid. Tiden er plottet på den horisontale aksen og verdiene til kontrollvariabelen på den vertikale aksen.

Diagrammer skal kunne kombinere flere sensorer for å sammenligne dem enkelt. Hvis forskjellige typer variabler med forskjellige enheter skal sammenlignes, bør verktøyet tilby muligheten til å inkludere en sekundær vertikal akse eller til og med en tredje akse. Flere skalaer kan også være nødvendig hvis de samme enhetene brukes, men størrelsesorden varierer betydelig mellom sensorer. Et eksempel vises i Figur 19.

Hvis overvåkningsdata for en lengre periode er tilgjengelig, kan det være nyttig å ta med det samme diagrammet to ganger i en årsrapport: Det første kan dekke hele tidsperioden for å vise langsiktig utvikling i hvordan dammen oppfører seg, mens det andre diagrammet kan f.eks. bare vise de siste 1 til 3 år for å gi grunnlag for en mer detaljert analyse av den siste perioden som dekkes.

Denne typen diagrammer er nyttig for alle slags sensorer og er grunnlaget for datatolkning. Nedenfor vises flere spesifikke typer diagrammer som grunnlag for å analysere hvordan dammen oppfører seg på en mer detaljert måte.



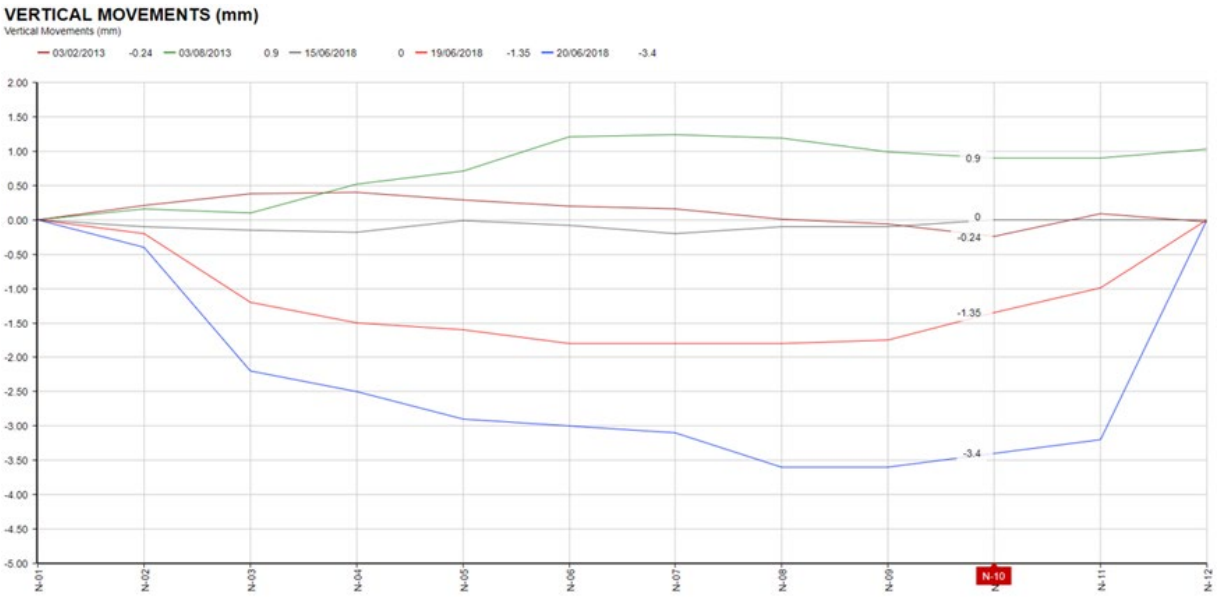
Figur 19 Tidsdiagram som viser tre skalaer for eksterne variabler: Magasinnivå (masl), nedbør (l/m^2) og temperatur (°C)

5.5.3 Stedsavhengighet

Overvåkningsdata kan vises som en funksjon av sted/lokalitet med overvåkningsdata for flere sensorer registret over en måletakingsperiode. På denne måten kan en lett identifisere ulikheter i hvordan forskjellige områder langs f.eks. damkrona eller et galleri oppfører seg.

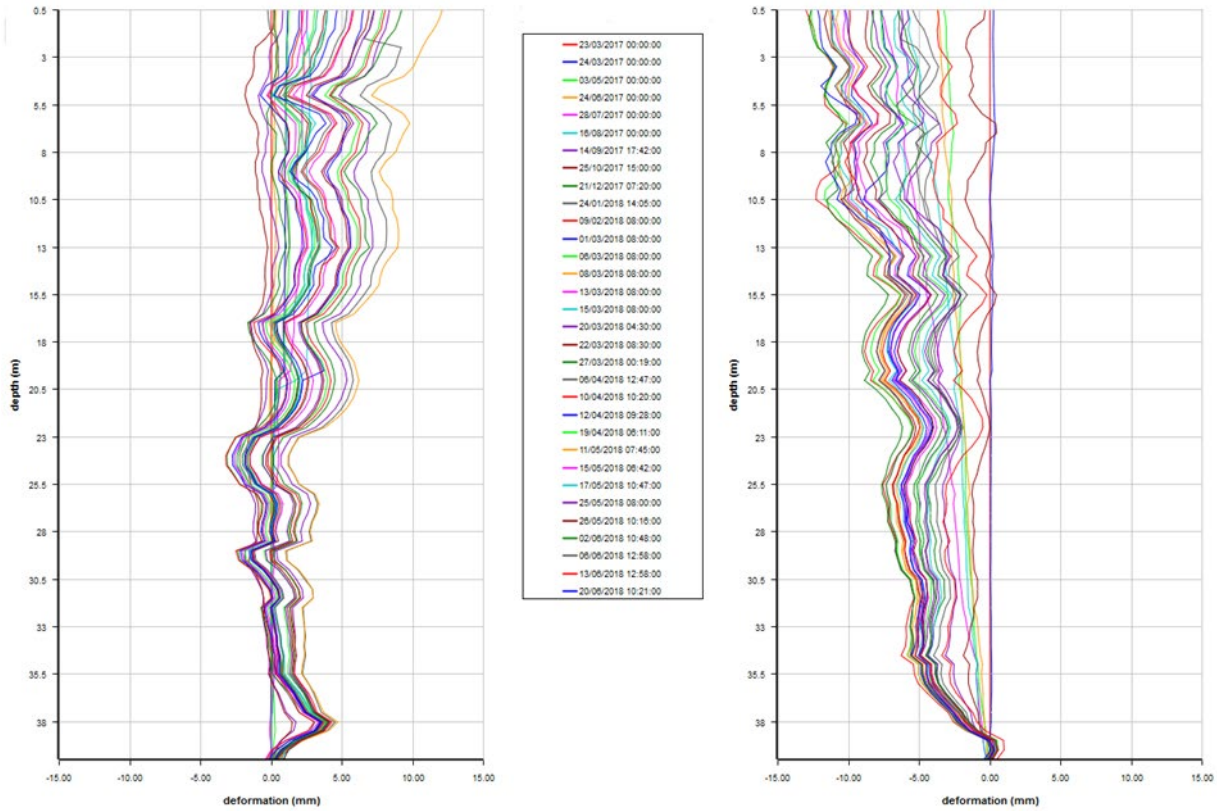
Et typisk eksempel er visualisering av deformasjoner registrert ved topografisk undersøkelse av alle kontrollpunkter langs damkrona. I andre tilfeller kan det gjøres sammenligning av piezometriske nivåer eller forskyvning i dilatasjonsfuger langs galleriet.

Denne typen diagrammer er vanligvis laget for sensorer som genererer data med større tidsintervall mellom avlesningene, men kan også brukes til utvalgte data fra sensorer som blir avlest oftere.



Figur 20 Diagram som viser setninger av damkrona

En spesiell visualisering med hensyn til sted/lokalitetsfunksjonen kan gjøres i forhold til måling av helning (inklinometermålinger). På grunn måten inklinometre er installert på, er det mer beskrivende å bruke vertikale diagrammer for å vise deformasjon av målepunktene som en funksjon av installasjonsdybden.

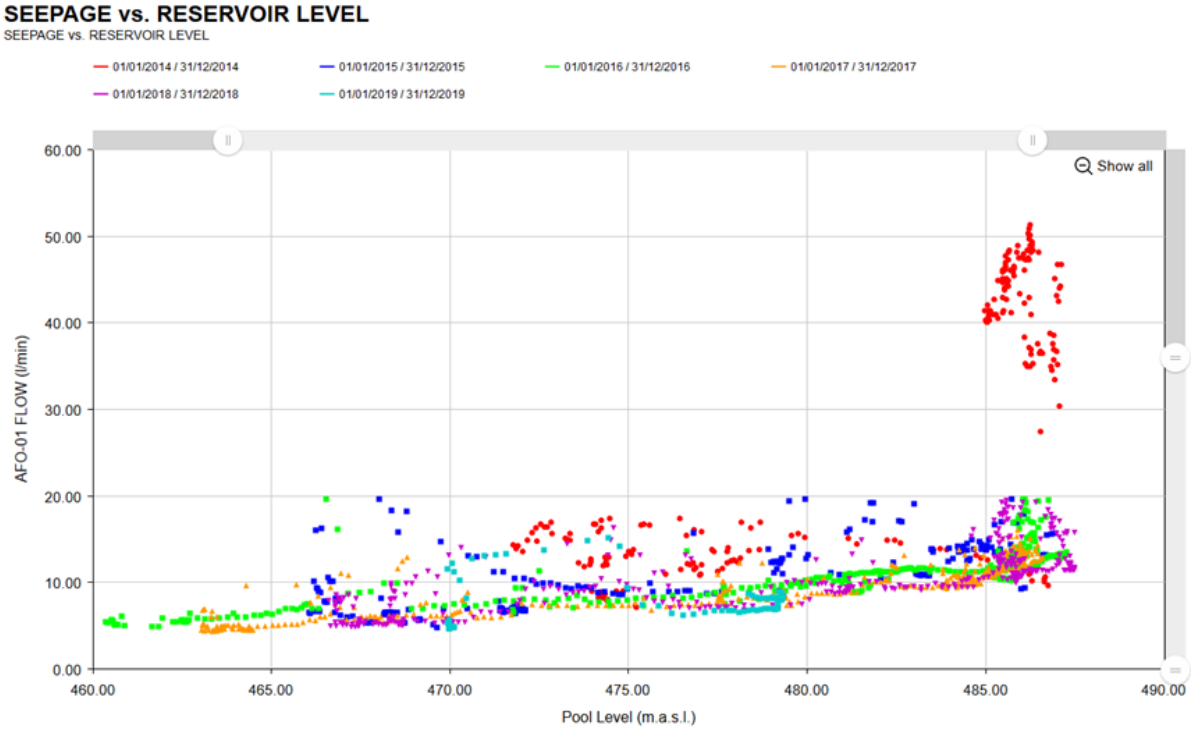


Figur 21 Diagram som viser inklinometer-bevegelser i A- og B-retninger langs borehull

5.5.4 Avhengighet av andre variabler

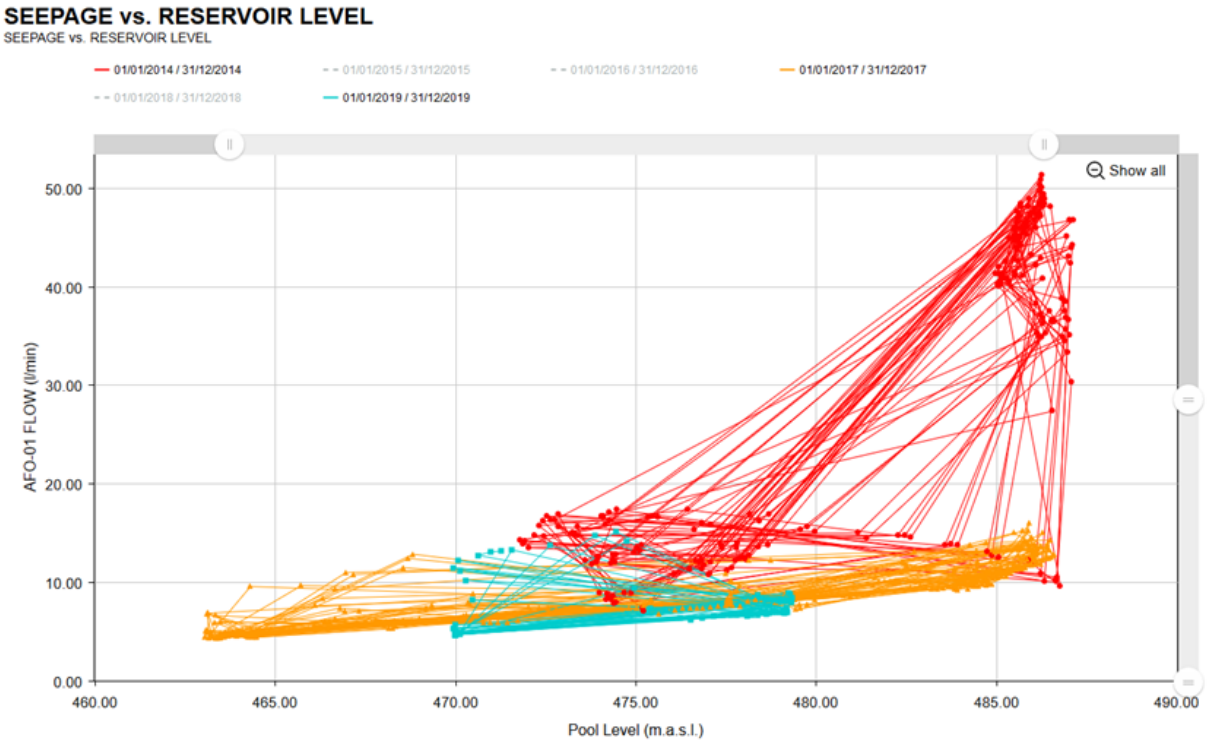
Utviklingen av de fleste kontrollvariabler avhenger hovedsakelig av utviklingen av eksterne variabler. Disse er vanligvis magasinnivå, lufttemperatur og nedbør. Men også andre kontrollvariabler kan brukes, for eksempel betongtemperatur eller opptrykk under dammen. For å illustrere dette forholdet brukes korrelasjonskart. Disse grafene viser forholdet mellom en kontrollvariabel hvis verdi er plottet på y-aksen og en ekstern variabel som er plottet på x-aksen.

I den følgende figuren er forholdet mellom magasinnivå og lekkasjemåling vist. Farger er brukt for å skille mellom forskjellige tidsrammer for å vise en mulig utvikling over tid.



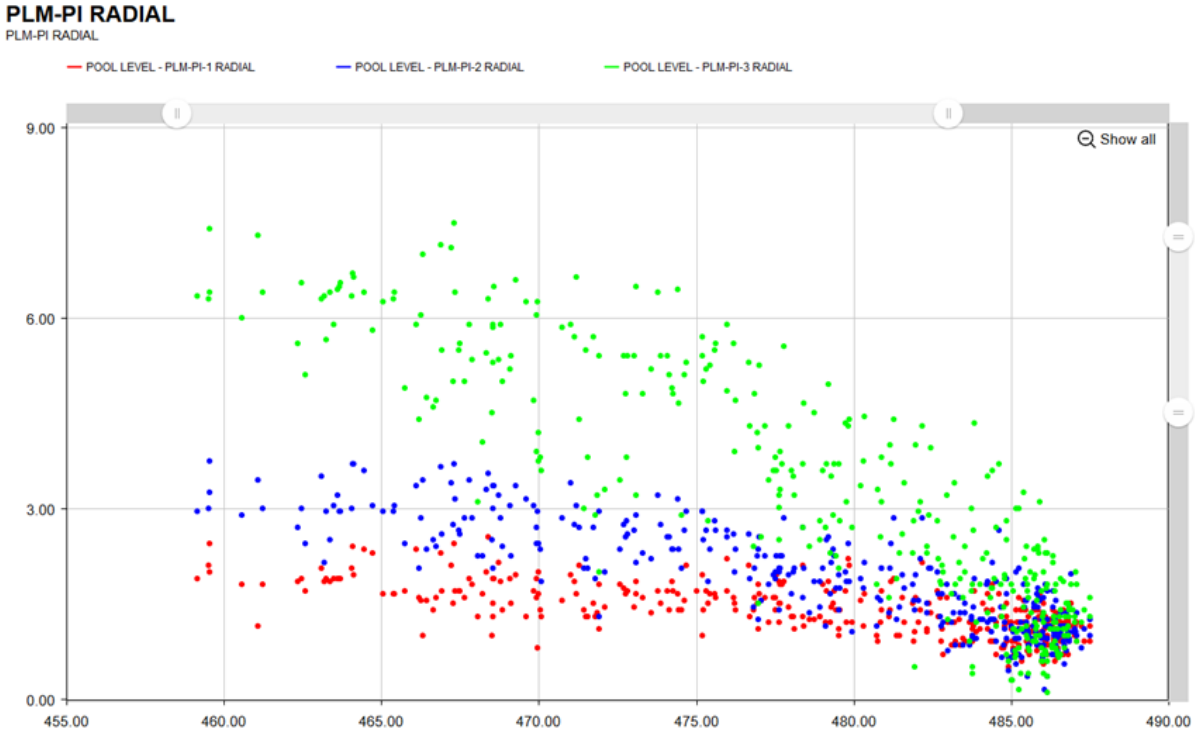
Figur 22 Diagram som viser lekkasjemåling mot vannstand for forskjellige tidsperioder

Ved å koble hver verdi i kronologisk rekkefølge, kan utviklingen over tid vises enda mer presist som vist i neste figur. Likevel kan disse diagrammene virke forvirrende hvis for mange verdier blir inkludert.



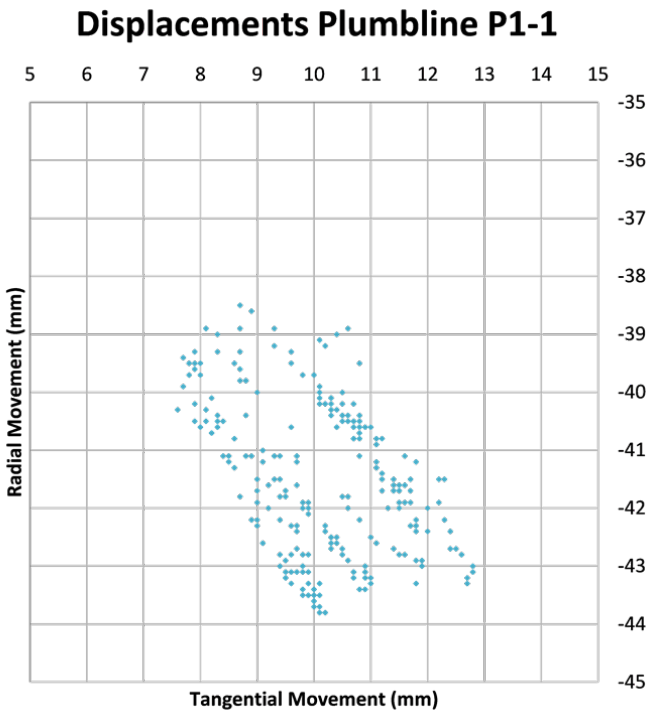
Figur 23 Diagram over lekkasjemåling mot vannstand i kronologisk rekkefølge for forskjellige tidsperioder

Et annet eksempel på korrelasjonsdiagram er sammenligningen av forskjellige sensorer innenfor en videre tidsramme. I dette tilfellet viser forskjellige farger ikke flere tidsrammer, men forskjellige sensorer. På denne måten kan en se om visse kontrollvariabler i større grad avhenger av en kontrollvariabel enn andre.



Figur 24 Radielle bevegelser i loddlinjer for tre forskjellige kontrollpunkter mot magasinnivå

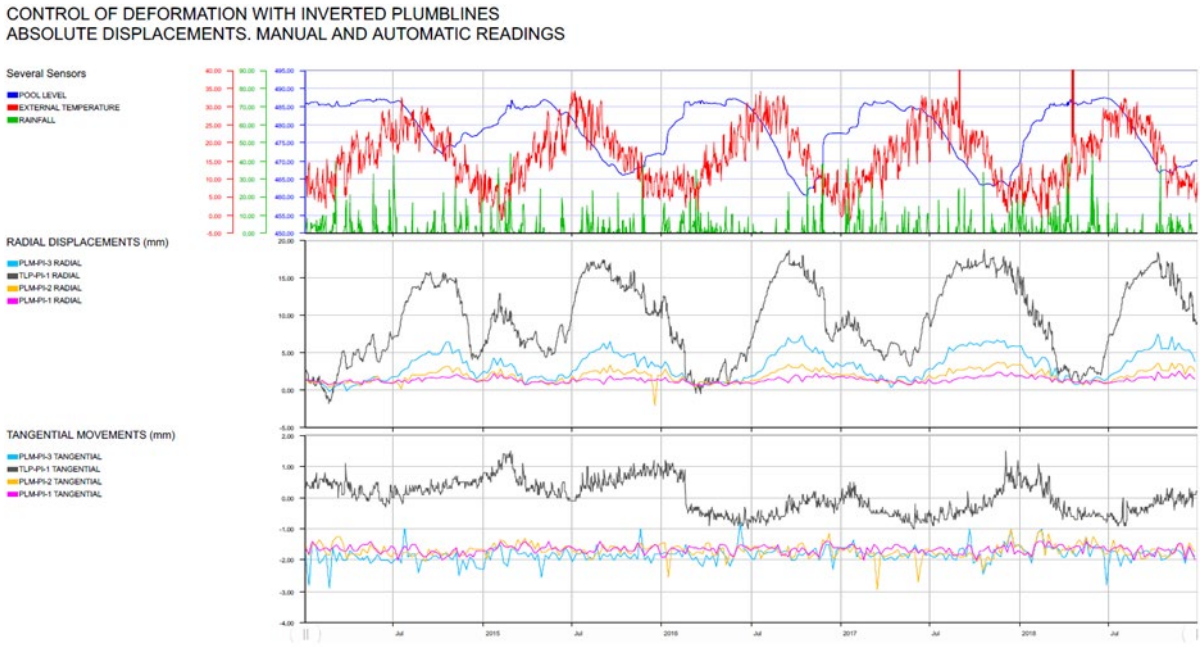
Noen sensorer har flere variabler, for eksempel loddlinjer, som registrerer forskyvninger i to retninger. Dette kan visualiseres på en beskrivende måte gjennom korrelasjonskart ved å bruke X- og Y-aksen for hver retning.



Figur 25 Korrelasjon mellom radielle og tangentiale bevegelser av loddlinjen

5.5.5 Kombinasjon av diagrammer

For datatolkning er det viktig å ha all nødvendig informasjon på én visning eller én side, spesielt hvis flere sensorer med forskjellige enheter eller størrelser må sammenliknes. I de fleste tilfeller er det bedre å inkludere rundt tre diagrammer med forskjellige sensorer i én visning i stedet for å bruke et diagram med mange sensorer. På denne måten kan informasjon struktureres på en bedre måte og tolkningen blir enklere. Den følgende figur og eksempel viser tolkning av loddlinjedata. Den inkluderer en kombinasjon av tre diagrammer som bruker samme tidsskala i horisontal retning. I den øvre delen vises eksterne variabler inkludert magasinnivå, temperatur og nedbør. Nedenfor er bevegelser av en loddlinje for fire forskjellige kontrollnivåer vist i to andre diagrammer som skiller mellom radiale og tangentiale bevegelser.



Figur 26 Diagram som kombinerer eksterne variabler og radiell og horisontal loddlinjebevegelse på forskjellige kontrollnivå

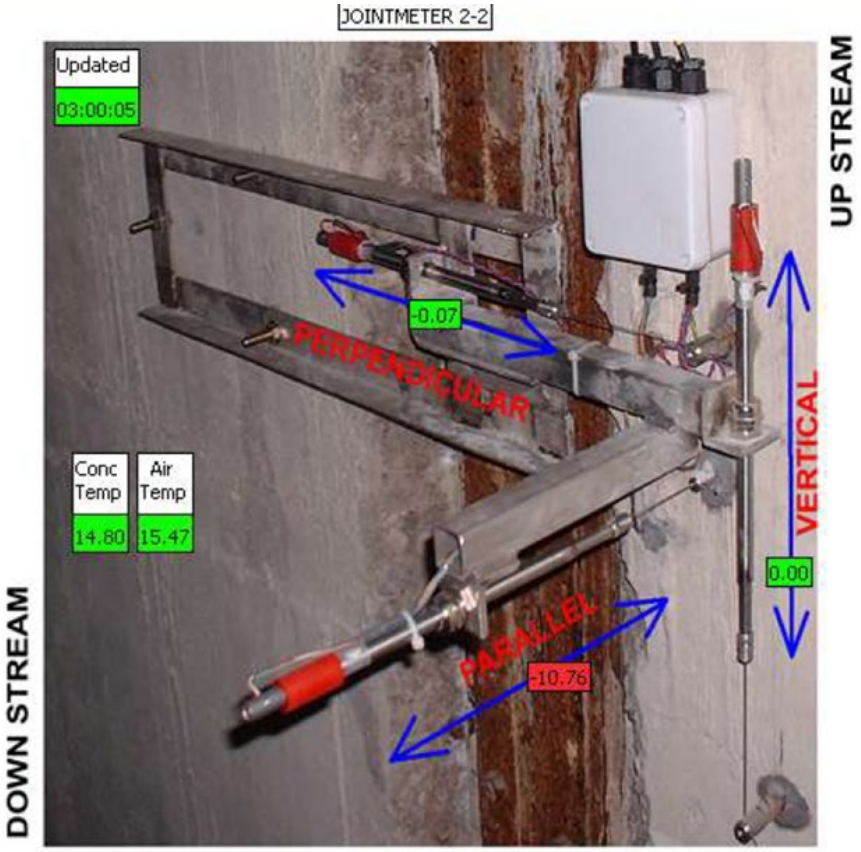
5.5.6 "Dashboard" - kartvisning - SCADA

Mange programvareløsninger inkluderer visninger som ligner på SCADA[3]-skjermer. Disse viser vanligvis avlesninger fra sensorer som er lagt på tegning, bilde eller kart. Dashboards er en type grafisk brukergrensesnitt som gir et overblikk over de viktigste opplysningene om overvåkningssystemet.

Disse visningene viser vanligvis data i sanntid eller de nyeste tilgjengelige dataene for hver sensor. De brukes hovedsakelig til å få en rask sjekk og oversikt over dammenes faktiske tilstand, uten at tidsperspektivet tas med i betraktning. De er fleksible og gir en god beskrivelse, og brukes ofte for å vise plasseringen av sensoren. Dette er spesielt nyttig for en bruker som ikke kjenner alle detaljene i overvåkningssystemet.

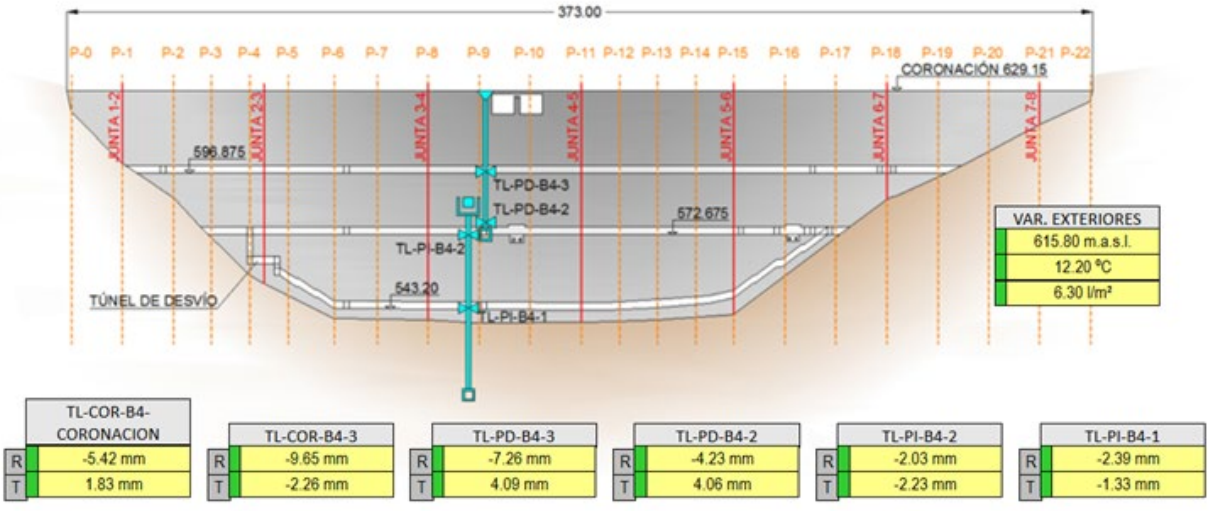
I den følgende figuren vises de forskjellige variablene til ett målepunkt. I dette tilfellet er den nåværende verdien av de forskjellige kontrollretningene til et tredimensjonalt ekstensometer ("jointmeter") vist.

[3] SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition



Figur 27 Visualisering av ekstensometermålere over dilatasjonsfuge [19]

I den neste figuren vises plasseringen av pendler sett forfra. Bortsett fra avlesningsverdien, brukes forskjellige farger for å indikere om avlesningen faller innenfor angitte terskel- eller utløserverdier.

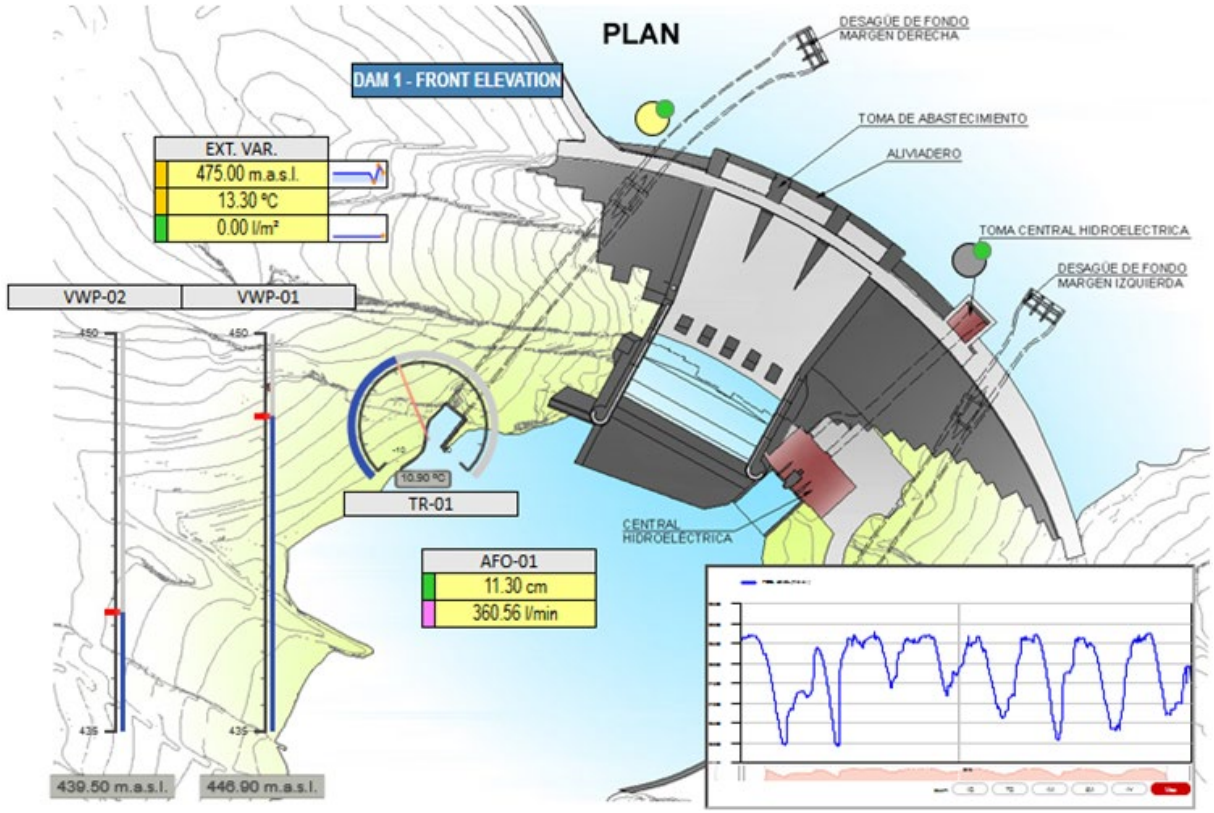


Figur 28 Visualisering av sanntids-verdier og alarmnivåer på dam sett fra nedstrøms side

Avhengig av hvor mye tid som investeres i utarbeidelsen av disse visningene, kan også 3D-tegninger eller bilder brukes.

Figur 29 Visualisering av sanntids-verdier og alarmnivåer på 3D-modell av en dam

Noen systemer gir muligheten for å inkludere verdier ikke bare som digitale tall, men også med en måler, kolonne- eller søylediagram. Dette gjør det mulig å vise nåverdien i forhold til satte grenseverdier. På denne måten kan en umiddelbart se om verdiene er under eller nær en terskel- eller utløserverdi.



Figur 30 Visualisering av sanntids-verdier med målere og søylediagram vist på plan

Disse visningene kan også være interaktive og inkludere verktøytips for å få fram ytterligere data eller knapper for direkte tilgang til annen informasjon relatert til den sensoren.

Figur 31 Visualisering av 3D-visning av dam i kombinasjon med verktøy-tips og pop-up-diagrammer

Dette konverterer denne typen visualisering til et kraftig verktøy for å navigere gjennom alle tilgjengelige data og få en god ide om dammens nåværende tilstand. Likevel, for en detaljert tolkning, er diagrammene nevnt i forrige kapittel viktige.

5.5.7 Tabeller

Selv om diagrammer er den mest visuelle måten å tolke data på, kan det i noen tilfeller være nyttig å trekke ut valgte data i tabeller.

Vanligvis er det ikke nødvendig å skrive ut en liste over alle avleste data, fordi denne informasjonen er vanskelig å tolke av leseren. Hvis den eksakte numeriske verdien må ses på, er det i de fleste tilfeller tilstrekkelig å gjøre dette direkte i databasen.

Likevel gir et sammendrag av utvalgte data merverdi for tolkning av data. Spesielt hvis de inkluderer en grunnleggende statistisk evaluering. Den mest representativ informasjon er ofte årlige maksimums- og minimumsverdier, årlige svingninger eller middelverdier.

Year 2018	Pool Level		Air Temperature		Rainfall (l/m²)
	Max (m.a.s.l)	Min (m.a.s.l)	Max (°C)	Min (°C)	
January	1082.70	1079.42	18.00	-4.00	145.40
February	1085.30	1082.14	14.00	-13.00	135.60
March	1087.46	1084.24	15.00	-5.00	76.70
April	1089.47	1087.63	15.00	-4.00	138.50
May	1090.17	1089.54	23.00	-2.00	54.20
June	1090.10	1088.72	29.00	2.00	23.50
July	1088.60	1085.84	32.00	6.00	8.50
August	1085.73	1083.46	33.00	5.00	6.80
September	1083.39	1081.54	36.00	3.00	14.10
October	1081.47	1080.00	24.00	-1.00	19.70
November	1079.96	1078.97	23.00	-3.00	130.60
December	1078.94	1078.15	17.00	-5.00	10.40
Mean Value	1085,27	1083,3	23,25	-1,75	63,67

Figur 32 Eksempler på tabell med månedlig og årlig (i rødt og blått) maksimal- og minimumsverdi for eksterne variabler, i tillegg årlig middelverdi

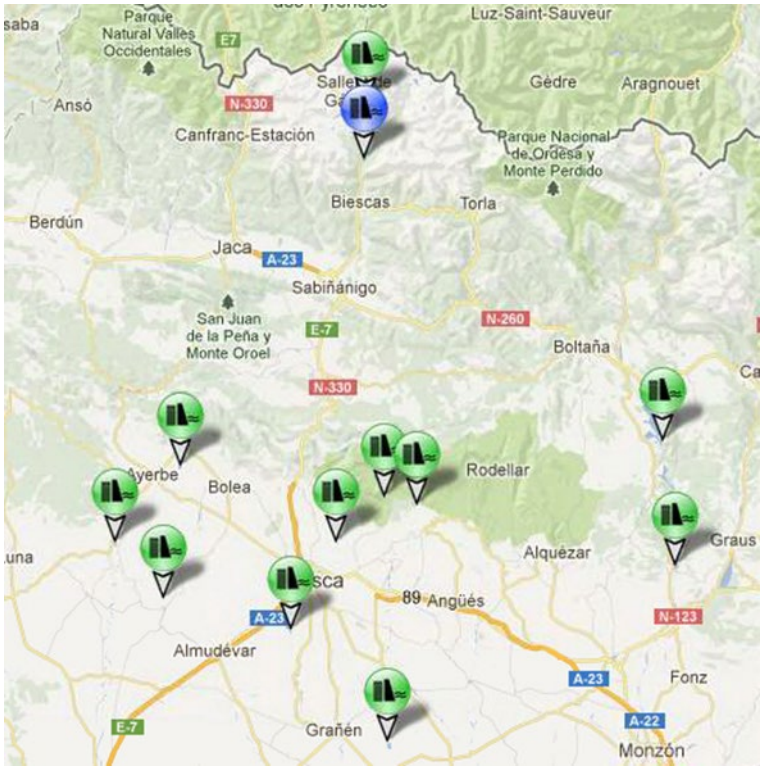
5.6 Ytterligere funksjoner

I dette kapittelet forklares noen tilleggsfunksjoner som allerede er eller kan integreres i overvåkingsverktøy. De fleste av dem gir tilleggsinformasjon og merverdi for analyse av dammens oppførsel eller en optimalisering av arbeidsprosedyrer. Som allerede nevnt i kapittel 5.2.2, kan disse tilleggsfunksjonene enten utgjøre en del av overvåkingsverktøyet eller en annen programvare.

5.6.1 GIS

I kapittel 5.5 ble visualiseringen av overvåkningsdata i kombinasjon med bilder og kart beskrevet. I motsetning til disse statiske bildene, tilbyr Geografiske informasjonssystemer (GIS) en mer dynamisk måte å vise data på. Ved å tilordne geografiske koordinater til hver sensor, kan dens beliggenhet sees med en *GIS Viewer* på kart og satellittbilder. GIS-verktøy lar brukeren se og bevege seg langs større soner og zoome til det interessante området.

Dette er spesielt nyttig for å håndtere flere dammer gjennom ett grensesnitt, eller hvis det dreier seg om administrasjon av et nett av hydro-meteorologiske stasjoner i vassdraget. Også for lange dammer kan visualisering av et utvalg overvåkingssensorer være nyttig.



Figur 33 Plassering av flere dammer på kartvisning

Figur 34 Plassering av målesøyler på damkrona med alarmnivåer

GIS-verktøy er ikke begrenset til en geografisk visualisering, men tilbyr også mange funksjoner for å vise tilleggsinformasjon. Dette kan gjøres ved hjelp av verktøytips eller inkorporering av forskjellige bakgrunnskartlag.

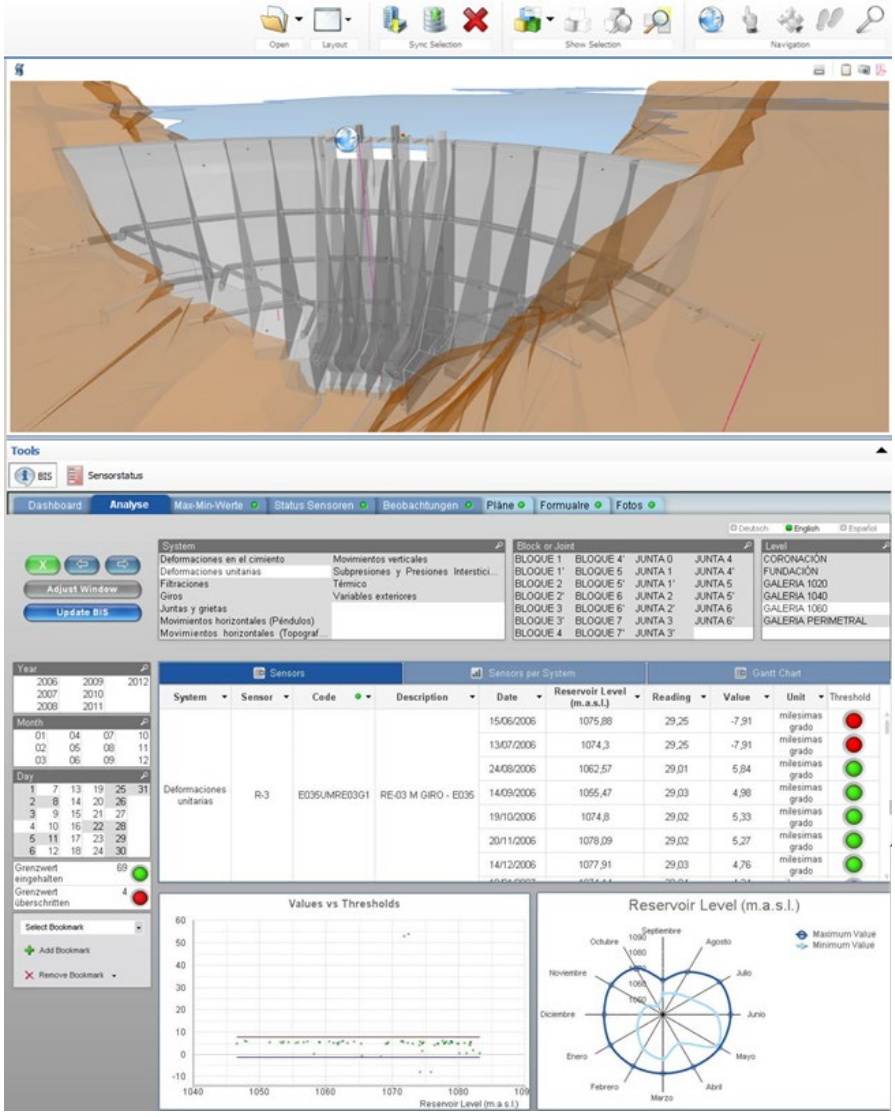
Likevel er det ofte ikke tilstrekkelig med en 2D-planvisning for å vise alle overvåkningsdata, spesielt hvis sensorene er fordelt langs flere gallerier eller installert på samme sted i forskjellige høyder. I dette tilfellet gir en tradisjonell SCADA-visning en bedre presentasjon. En mer sofistikert tilnærming vil være en 3D-GIS eller BIM-løsning som nevnt i det følgende kapittelet.

5.6.2 Building Information Modelling – BIM

Building Information Modelling (BIM) gir merverdi og synergier ved å koble forskjellige typer data til 3D-modeller. Modellene inkluderer verdifull informasjon om fasiliteter og infrastruktur under prosjektering, bygging og drift. Det er en digital representasjon av fysiske og funksjonelle egenskaper ved et anlegg.

BIM gir også mange muligheter for å håndtere overvåkningsdata. Det første trinnet er visualisering av det installerte overvåkingssystemet i en 3D-modell. Dette hjelper brukeren til å få en bedre forståelse av plasseringen av hvert element og geometrien og plassering av strukturen. En navigasjonsmeny lar brukeren vri modellen i hvilken som helst retning, "gå" langs gallerier og zoome til de forskjellige elementene som er inkludert i modellen. Tatt i betraktning at en 3D-modell er digital, kan det etableres alternative synsvinkler som ikke er tilgjengelige i 2D-tegninger. I tillegg kan enda mer informasjon som geologi og konstruksjonsdetaljer inkluderes.

Men BIM er ikke bare en 3D-visualisering av informasjon. Ved å koble overvåkningsdata og annen informasjon for styring av damsikkerhet, kan merverdi oppnås. Dette kan være observasjoner fra visuell inspeksjon og vedlikeholdsarbeid.



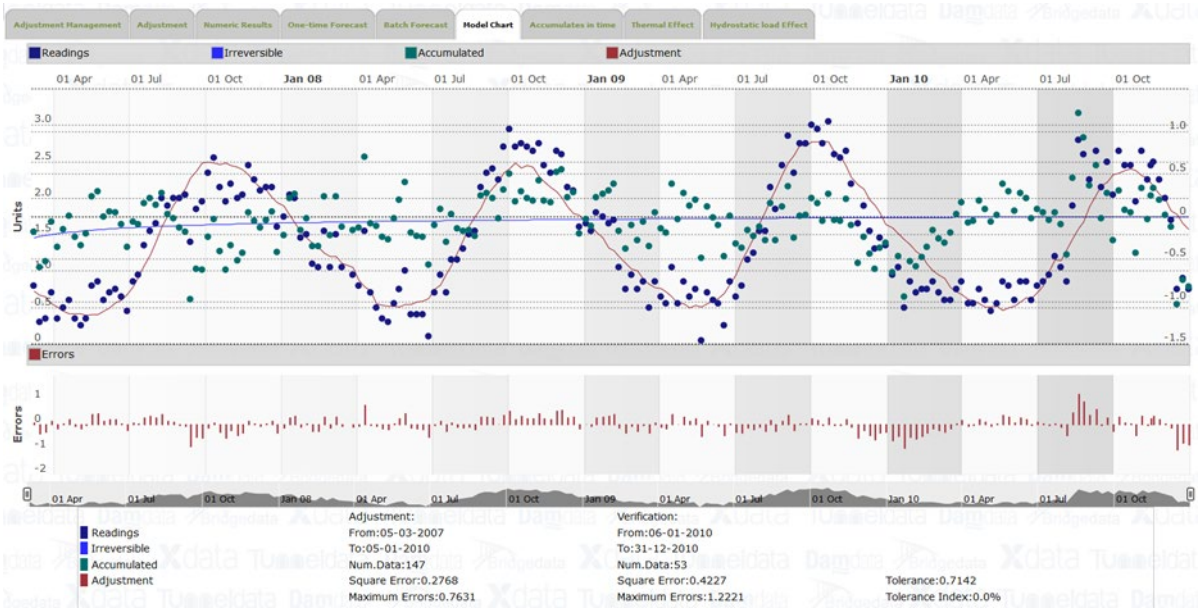
Figur 35 Kombinasjon av instrumenteringsdata med 3D-modell (BIM)

Bruken av en slik løsning kan gå lengre enn bare å administrere overvåkningsdata og kan brukes som et styrings- (Asset Management) verktøy.

5.6.3 Statistiske modeller

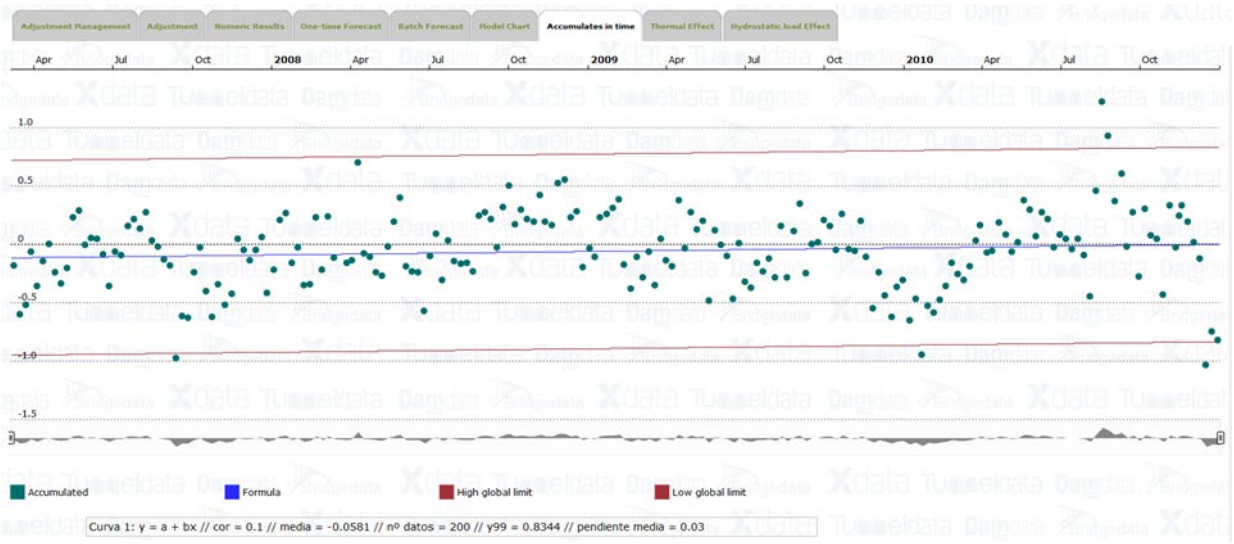
For en mer detaljert analyse av historiske tidsseriedata kan en statistisk evalueringsmodell brukes. Hvis man bruker et generelt statistisk evalueringsverktøy, må data overføres manuelt eller automatisk gjennom et grensesnitt fra overvåkingsverktøyet. Dette unngås hvis modellen allerede er integrert i styringsverktøyet for damovervåking og samme datagrunnlag blir brukt.

Målet med en statistisk modell er å bestemme en regresjonskurve som beskriver utviklingen av en overvåkingsvariabel så presis som mulig. Påvirkning av viktigste eksterne effekter som magasinnivå, temperatur, nedbør og irreversible effekter over tid kan vurderes.



Figur 36 Statistisk evaluering av instrumenteringsdata

Ved å isolere effekten av hver av disse komponentene, kan deres innvirkning på atferden til kontrollvariabelen kvantifiseres. Dette kan også være et kraftig verktøy for å oppdage irreversible virkninger, for eksempel økning av piezometrisk trykk eller deformasjon av damkroppen over tid ved å isolere andre eksterne effekter.



Figur 37 Evaluering av irreversible virkninger over tid

Den innhentede informasjonen kan brukes til definisjon av terskelverdier og forventningsverdier for kontrollvariabler under forhåndsdefinerte grensebetingelser ved bruk av en kombinasjon av tid, temperatur og magasinnivå.

Bortsett fra statistiske modeller, kan nevron-etterlignende nettverk (sett med algoritmer for å oppdage mønstre) og maskinlæringsmetoder gi tilleggsinformasjon. Dameieren bør imidlertid være klar over at man må ha eksperter til å håndtere denne typen modeller.

Til slutt må det understrekes at statistiske modeller trenger representative data over en viss periode for å gi resultater med den nødvendige presisjon. Se også [20] for en god oppsummering av statistiske modeller som kan brukes for analyse av damovervåkningsdata.

6 Datatolking

6.1 Innledning

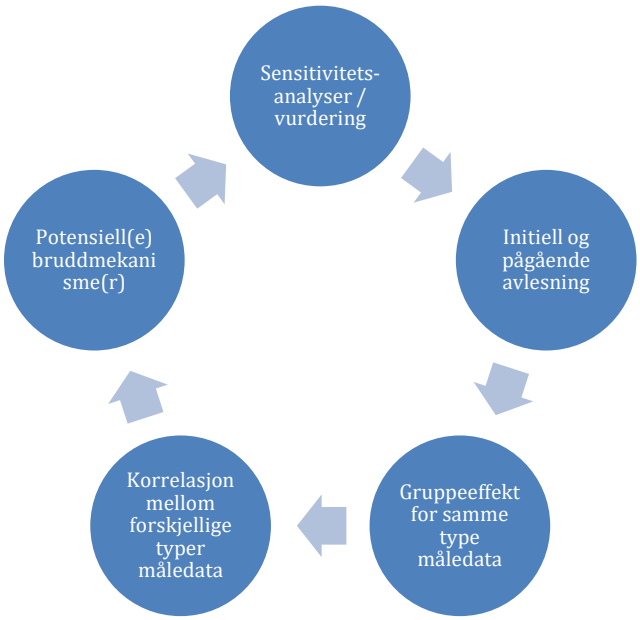
Damovervåking er en del av et større program som også inkluderer oppgaver som for eksempel visuell inspeksjon og testing (se også Figur 3). Kombinasjonen av alle damovervåkingsoppgaver er et av de viktigste grunnlagene for damsikkerhetsvurdering under bygging og drift. En økt mengde sanntidsdata og forbedrede programvareløsninger gir muligheter for å automatisere noen av datatolkningsoppgavene. Bare å basere seg på grenseverdier / aksjonsverdier basert på overvåkningsdata uten ytterligere tolkning er imidlertid utilstrekkelig for å skaffe seg en fullverdig oversikt over sikkerhetstilstanden til en dam. *Derfor er en detaljert analyse gjort av en erfaren ingeniør fremdeles viktig og kan ikke erstattes av en automatisk dataevaluering*. Informasjon gitt av programvareverktøy for styring av overvåkningsdata kan være *et effektivt hjelpemiddel i beslutningsprosessen*.

I dette kapittelet diskuteres forholdet mellom overvåkningsdata og damsikkerhet. Overvåkningsdataene må behandles og tolkes for å gi meningsfull informasjon om tilstanden til en dam. Det er også tilfelle for å vurdere om beredskapstiltak skal iverksettes. Kommersielle dataprogrammer for overvåking som omtalt i kapittel 5 er et godt verktøy i denne prosessen. Kobling av overvåkningsdata med mulige dambruddssituasjoner / -scenarier vil hjelpe ingeniøren (VTA, rådgiver) med å tolke data på en effektiv og målrettet måte og gjøre det mulig å oppdage unormal oppførsel på et tidlig stadium.

Gjennom noen utvalgte eksempler vil det vises hvordan en kombinasjon av overvåkingsdata, visuelle inspeksjoner og undersøkelser kan være relevant for potensielle dambruddssituasjoner/scenarier. Kapittelet er organisert på følgende måte:

- Typiske og mulige dambruddssituasjoner / -scenarier for utenlandske og norske dammer (avsnitt 6.2). Avsnittene viser hva slags situasjoner overvåkningsdata skal oppdage.
- Valgte data for overvåkning av dammen og dens grunnleggende egenskaper (avsnitt 0). Avsnittet viser de vanligste overvåkingsdataene som er tilgjengelig på norske dammer, og hvordan dataene kan brukes til å vurdere sikkerhetssituasjonen til en dam.
- Scenarier for damstabilitet: kombinasjon av farenivåer / dambruddsforløp og overvåkingsmønster og typiske eksempler på virkelige situasjoner (avsnitt 6.4).
- Anbefalinger om terskel- og utløserverdier og pålitelighet (avsnitt 6.5).

Kapittelet er basert på dokument- og litteraturstudier, i særlig grad ICOLD-dokumenter [7][8][10][15], i tillegg har en lagt til grunn forskningsresultater fra USA [12][13], Storbritannia [11] og Australia [14].



Figur 38 Overvåkingsstrategi – sammenheng mellom forskjellige typer data, iterasjons-prosess

6.2 Typiske potensielle dambruddsforløp for norske dammer

6.2.1 Innledning

En detaljert liste over typiske dambruddssituasjoner / -scenarier er presentert i Defra-rapporten [11] hvor 12 dambruddssituasjoner/scenarier og 46 faresituasjoner er oppsummert. I rapporten er dambrudd definert som større, ukontrollert og utilsiktet utslipp av vann, mens en faresituasjon er definert som uønsket personskade eller materiell skade på dammen. Én eller flere faresituasjoner i kombinasjon kan utvikle seg til et dambrudd hvis det ikke blir satt inn tiltak. Derfor bør *overvåking fokusere på tidlig oppdagelse av feil og faresituasjoner* som kan føre til et dambrudd.

6.2.2 Sammendrag av dambrudds- og faresituasjoner

På grunnlag av litteratur- og dokumentstudiene av de 12 feil- og 46 faresituasjonene Defra-rapporten[11], kan de ulike kan feil- og faresituasjonene grupperes og oppsummeres i Tabell 3:

Tabell 3 Dambrudds- og faresituasjoner etter Defra

NR.	**Defra dambrudds- eller faresituasjon**	**Kommentarer med henblikk på norske forhold**
1	Overtopping på grunn av setninger i dammen eller for liten kapasitet av flomløpet i forhold til flomstørrelser	Relevant for norske dammer
2	Forringelse av fyllingsdammens tetningskjerne forårsaket av vannsig og indre erosjon	Relevant for norske dammer
3	Forringelse av ubehandlede / sprøytebetong-behandlede damfundamenter, forårsaket av vannsig og indre erosjon for forskjellige damtyper	Relevant, men ikke vanlig i Norge fordi norske dammer ofte er fundamentert på godt fjell med lav permeabilitet
4	Risiko relatert til hydrauliske konstruksjoner som for eksempel overløp, blokkering av flomløp, utilstrekkelig energidreping, overtopping av kanaler etc.	Relevant for norske dammer
5	Strukturell ustabilitet av betongdammer	Relevant, men fører sjelden til totalt dambrudd på grunn av strenge krav til inspeksjon av betongdammer i Norge
6	Påkjenninger på grunn av ising / isgang og bølger, inkludert lokale tsunamibølger forårsaket av store jordskred	Relevant men fører sjelden til svikt unntatt mulige, men sjeldne tsunamibølger forårsaket av store skred eller steinsprang. Dambrudd pga. frost / is i telefarlig materiale langs tappekulvert i fyllingsdam har forekommet i Norge
7	Kjemiske forandringer og prosesser som forringer og forårsaker skader på tetningskjernen, betong, fundament, geomembran etc.	Relevant, men fører sjelden til dambrudd på grunn av strenge krav om inspeksjon av dammer i Norge
8	Forverring forårsaket av dyr, vegetasjon og menneskelig aktivitet	Generelt mindre relevant for norske dammer fordi (1) de fleste fyllingsdammer i Norge er steinfyllingsdammer; (2) strenge krav til dekning med sprøytebetong; (3) strenge inspeksjonskrav
9	Jordskjelvbelastning	Generelt mindre relevant på grunn av lav jordskjelvaktivitet og lave jordskjelvsstyrker i Norge, men i enkelte tilfeller er jordskjelvlast dimensjonerende

Det bør bemerkes at over 70 % av alle dambrudd for fyllingsdam skyldes overtopping og indre erosjon ifølge ICOLD [21]. Det tilsvarer årsakene nevnt i punktene 1 til 4 i listen i Tabell 3, og de er også de mest relevante situasjonene i forhold til dammer i Norge.

6.3 Utvalgte typer målinger og deres karakteristikker for overvåkning av dammer

I dette avsnittet diskuteres de vanligste kontrollvariablene, som deformasjon, vannsig og poretrykk, hver for seg.

6.3.1 Deformasjonsmålinger

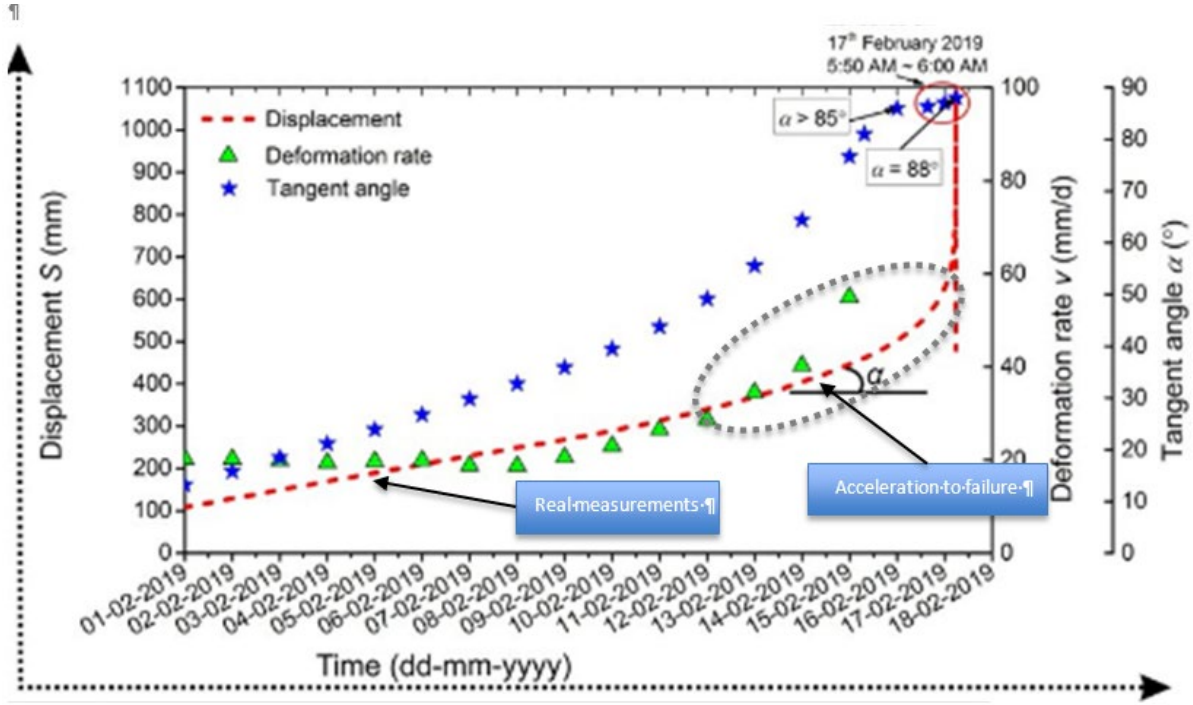
Deformasjon kan måles med forskjellige metoder på damkrona, på sidene oppstrøms og nedstrøms, og inne i dammen (topp kjerne for fyllingsdammer, og / eller inne i gallerier generelt). Man kan skille mellom absolutte og relative forskyvninger og deformasjoner.

Fra et analytisk synspunkt er det veldig vanskelig å etablere en utløserverdi for deformasjon som har et nøyaktighetsnivå som er representativ for damstabiliteten. Årsaken er at dammer generelt er designet med forenklede belastningsforhold og ytterligere sikkerhetsmarginer, men i praksis vil deformasjoner bli forårsaket av en kombinasjon av mange komplekse effekter som temperaturvariasjoner, kjemiske reaksjoner, konsolidering (setninger), vanntrykk og så videre. Derfor kan terskelverdier lettere defineres med statistiske modeller, hvis representative data er tilgjengelige.

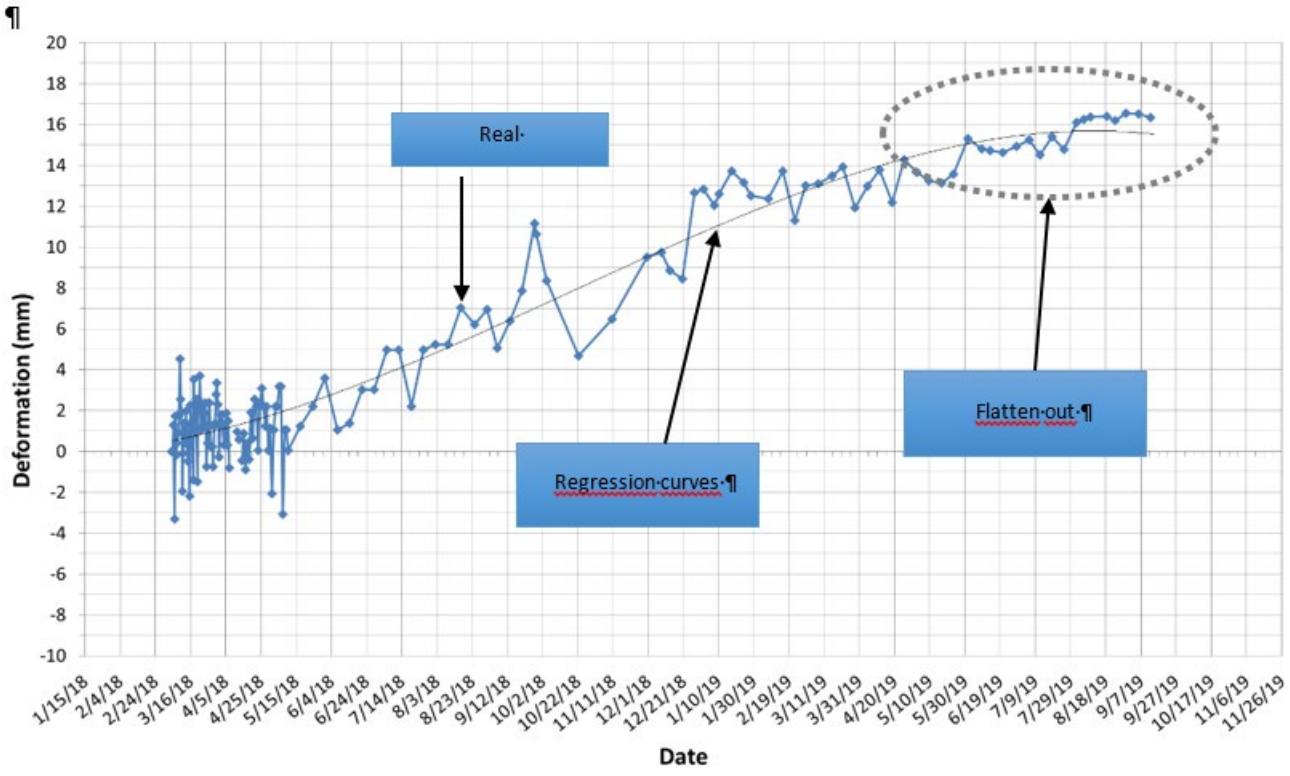
Videre har forskjellig damtyper ulike toleransenivåer for deformasjon. Fyllingsdammer er vanligvis utsatt for en betydelig høyere deformasjon i løpet av levetiden enn betongdammer.

I det følgende er noen holdepunkter for tolkning av deformasjonsdata for norske dammer oppsummert:

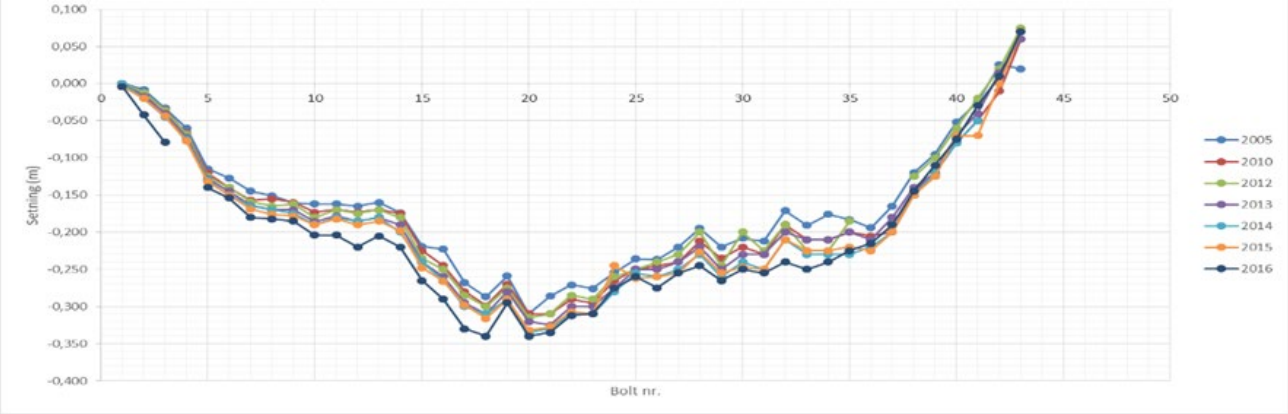
- Korrekthet og representativitet av data og sensorkalibrering må verifiseres for å unngå å tolke feilaktige data som unormal oppførsel. Det betyr ikke at man skal sortere ut "ubehagelige" data før det er kontrollert at de virkelig er feilaktige!
- Instrumentenes nøyaktighet må vurderes før dataene tolkes.
- Regler med hensyn til tegnsetting må være tydelig definert: Brukeren skal kjenne retningen til sensoren og retningen for hver bevegelse (oppstrøms - nedstrøms, venstre og høyre vederlag) og, i tilfelle absolutte verdier, koordinatsystemet. I Figur 42 er retningen på horisontale bevegelser målt med 4 loddlinjer i damkrona, anskueliggjort med et horisontalt snitt.
- Ikke bare absolutte verdier bør analyseres, men også deformasjonshastigheter som gir tilleggsinformasjon. Typiske eksempler på akselerert deformasjon som kan forårsake dambrudd samt utflating av deformasjonsraten er vist på henholdsvis Figur 39 og Figur 40.
- Et typisk setningsmønster langs damkrona til en fyllingsdam er vist på Figur 41. Anomalier bør studeres godt mot andre damovervåkingsdata og -metoder for å danne seg et bilde av damstabiliteten.
- Et typisk mønster av vertikale bevegelser langs damkrona på en betongdam på grunn av variasjoner i lufttemperatur over året er vist på Figur 43. I tillegg kan effekten av utvidelse av betongen over tid observeres.



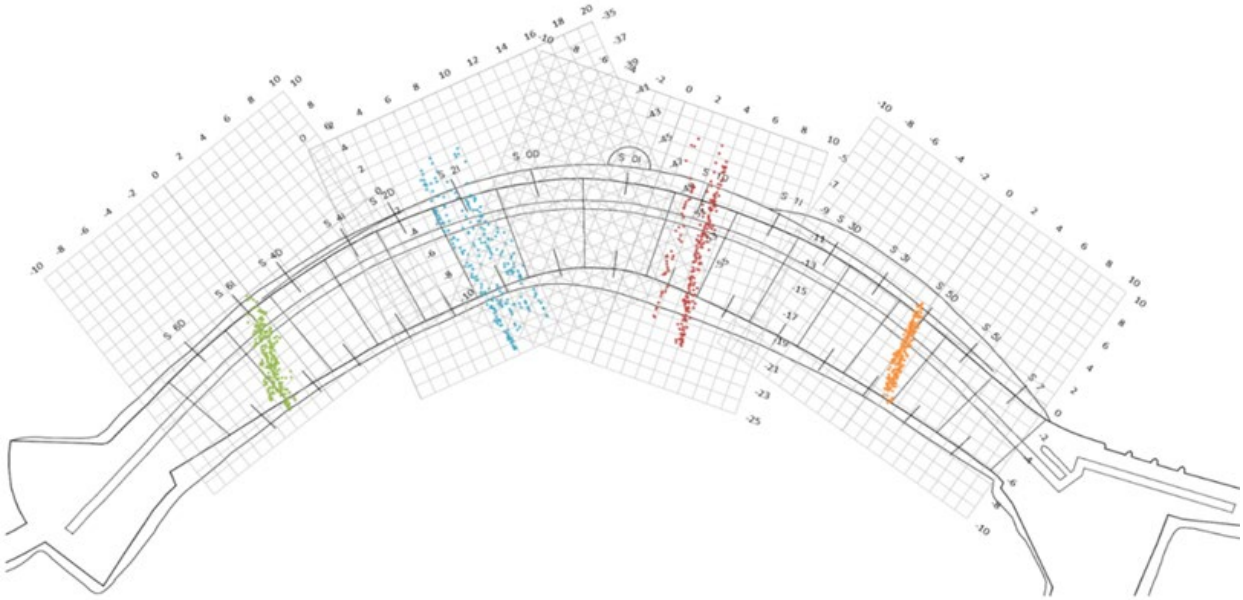
Figur 39 Eksempel på en typisk akselererende deformasjonsprosess som kan ende i dambrudd



Figur 40 Eksempel på typisk utflatende deformasjonsprosess

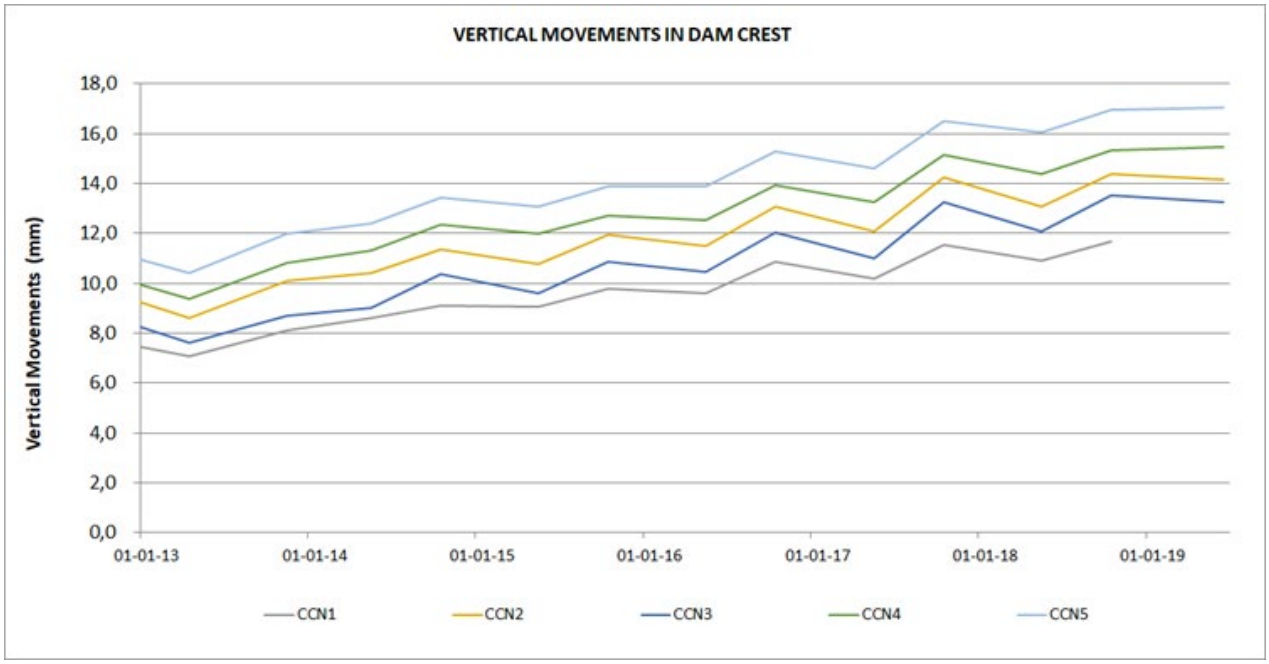


Figur 41 Typiske setninger langs damkrona av en fyllingsdam (høydeavhengig)



Figur 42 Horisontale bevegelser i loddlinja observert på 4 steder langs damkrona

Som diskutert tidligere, bør unormale verdier for deformasjon vurderes sammen med andre observasjoner som inngår i damovervåkingsprogrammet for å få et riktig helhetsinntrykk av dammens stabilitet. Ekstra informasjon og data fra forskjellige overvåkingssystemer kan bekrefte riktigheten av verdier. Spesiell oppmerksomhet bør rettes mot irreversibel deformasjon eller akselererte forskyvninger. Dette kan indikere ugunstige damstabilitetsforhold.



Figur 43 Vertikale bevegelser langs damkrona til en betongdam som en funksjon av tid - observasjon av virkningen av lufttemperatursvingninger og utvidelse over tid

6.3.2 Måling av lekkasjer

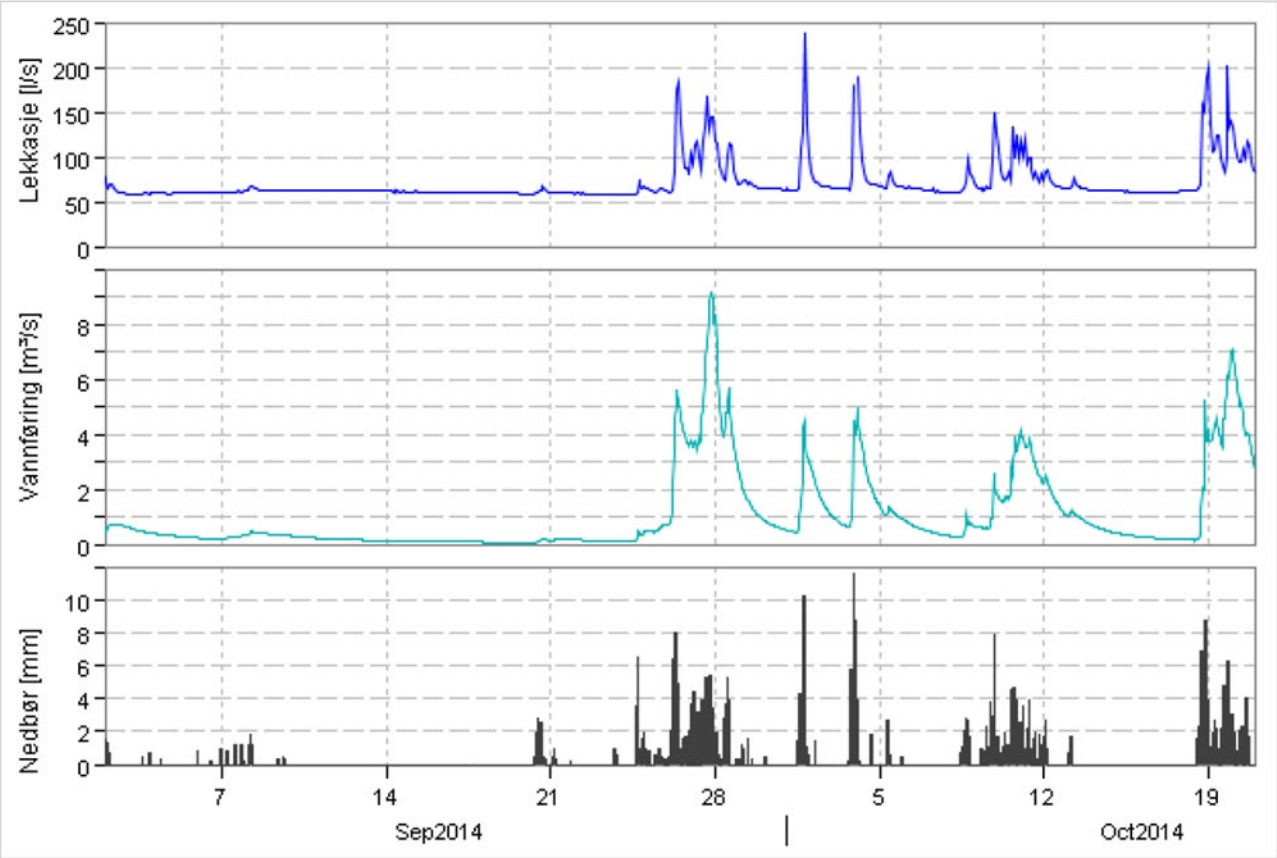
Lekkasjemåling ved hjelp av V-overløp (unntaksvis også over flatt "U-formet" overløp) er det vanligste overvåkningsinstrumentet som brukes for lekkasjemåling på norske fyllingsdammer. Akkurat som med deformasjonsmålinger er det imidlertid vanskelig å etablere en nøyaktig utløserverdi med deterministiske modeller. Årsaken er at lekkasjen i stor grad henger sammen med usikkerhet om permeabiliteten til materialet som er brukt i dammen og egenskapene til fundamentet. Derfor kan statistiske modeller være en bedre måte å etablere en terskelverdi på.

Når en materialpermeabilitet blir estimert i laboratoriet eller ved in situ-tester på stedet, er nøyaktigheten vanligvis av en størrelsesorden på f.eks. 10^{-5} eller 10^{-6} m/s ved fastsettelse av permeabiliteten. Dette betyr at lekkasjevolumet gjennom dammen har en nøyaktighet på 10 ganger mer eller mindre. Når en lekkasje er på et visst høyt nivå vil det dessuten være den turbulente strømningen som dominerer i stedet for den laminerte strømningen under Darcys lov, som nesten all kommersiell programvare for lekkasjeanalyse er basert på.

En typisk tidsserie for måling av lekkasje er vist på Figur 44. Følgende punkter bør vurderes under tolkningen av slike data:

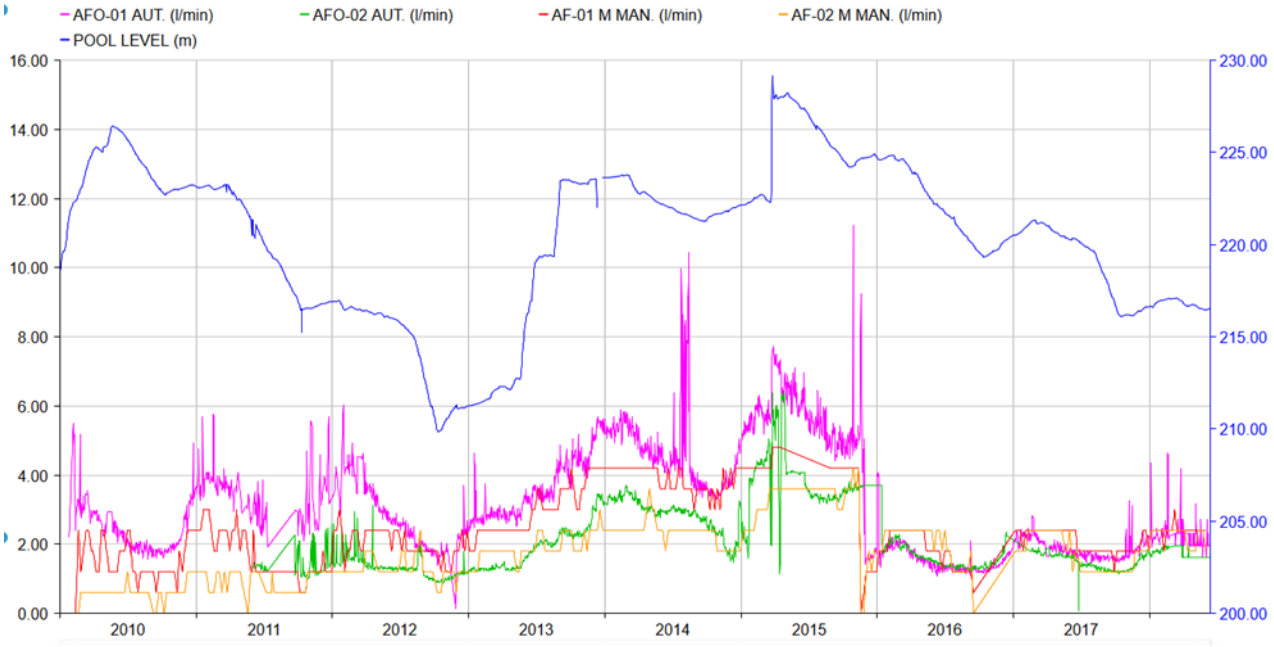
- Korrekthet og representativitet av data og sensorkalibrering må verifiseres for å unngå å forveksle avvikende data med unormal oppførsel.
- Instrumentnøyaktigheten må vurderes før en tolker dataene.
- Enheter må være tydelig definert (l/s, l/min, m^3/min)
- Det er viktig å se på utviklingen av lekkasjemålingene, spesielt hvis det dreier seg om økt lekkasje over tid. Det er også nyttig å sammenligne lekkasjen med lekkasje i samme tidsperiode (årstid) i tidligere år.
- Nedbør og magasinvannstand (se Figur 44[6]) er de viktigste eksterne faktorene som påvirker lekkasjer / lekkasjemålinger, men også temperatur (snøsmelting) kan ha betydning.
- For å kunne oppdage tegn på potensiell indre erosjon, bør visuelle inspeksjoner gjøres og lekkasjevann bør analyseres med hensyn til sedimenter og oppløst materiale.

Som tidligere nevnt må lekkasjemåling også sees i sammenheng med andre observasjoner og målinger gjort under hele overvåkingsprogrammet. Det er spesielt viktig å sammenligne lekkasjemålingene med oppstrøms vannstand, nedbør og temperatur, eksempel se Figur 44. En bør se etter tegn til indre erosjon. Instrumentering for turbiditetsmålinger kan være nyttig. Kameraovervåking av målekammeret er ikke alltid egnet til å vurdere blakking av lekkasjevann.



Figur 44 Typiske lekkasjemålinger plottet sammen med tilsig og nedbør, Svartavassdammen i Haugsdalsvassdraget [6]

Lekkasjemålinger gir viktig informasjon om en dams tilstand. Lekkasjer kan ikke bare true en dams stabilitet, men representerer også et økonomisk tap i mange tilfeller. De økte lekkasjevolumene til den utenlandske dammen vist i Figur 45 utløste omfattende rehabiliteringsarbeid. Figuren viser også den innflytelsen magasinvannstanden har på lekkasjene. I tillegg kan automatiserte og manuelle avlesninger sammenlignes for å bekrefte at målingen er riktig. Etter tetningsarbeider i slutten av 2015 ble det en reduksjon av lekkasjene.



Figur 45 Manuelle (oransje og røde) og automatiske (rosa og grønn) målinger av lekkasje før og etter tetningsarbeider i 2015. Den blå linjen viser magasinvannstanden

6.3.3 Måling av porevannstrykk

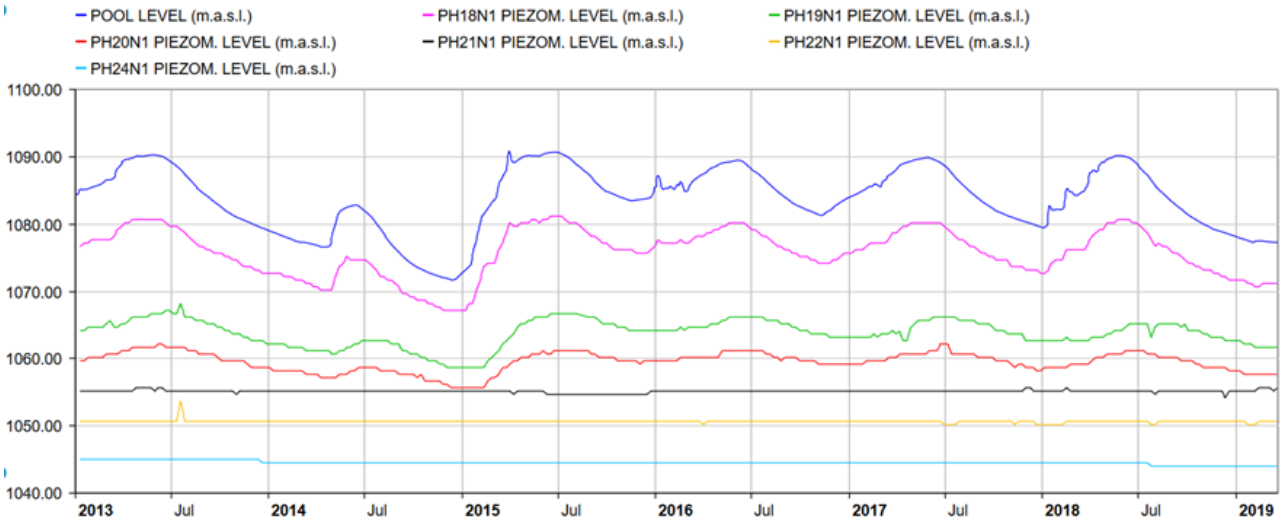
Måling av porevannstrykk er en direkte metode for å overvåke opptrykket under betongdammer eller utviklingen av piezometriske trykknivåer i damkroppen eller fundamentet til fyllingsdammer.

Porevannstrykket er direkte og nøye korrelert med damstabiliteten. Derfor kan relativt pålitelige terskel- eller utløserverdier etableres ved denne analysemetoden, i motsetning til deformasjons- og overvåkningsmålinger. Dette er omtalt i detalj i avsnitt 6.5.

Installasjon av piezometere i dammen skal helst skje under byggingen, men dette kan også gjøres i ettertid. Ikke desto mindre er installasjon i damkroppen/fundament til eksisterende fyllingsdammer mer komplisert, og etter installasjon må være godt planlagt for å unngå skade på kjernen av dammen, filtersoner og drenasjelag. Piezometerinstallasjon er kostbart fordi det krever borearbeid som vanligvis er mye dyrere enn innkjøp av selve piezometeret. Det er dessuten relativt vanskelig å opprettholde overvåkningsfunksjonen til piezometere over lang tid.

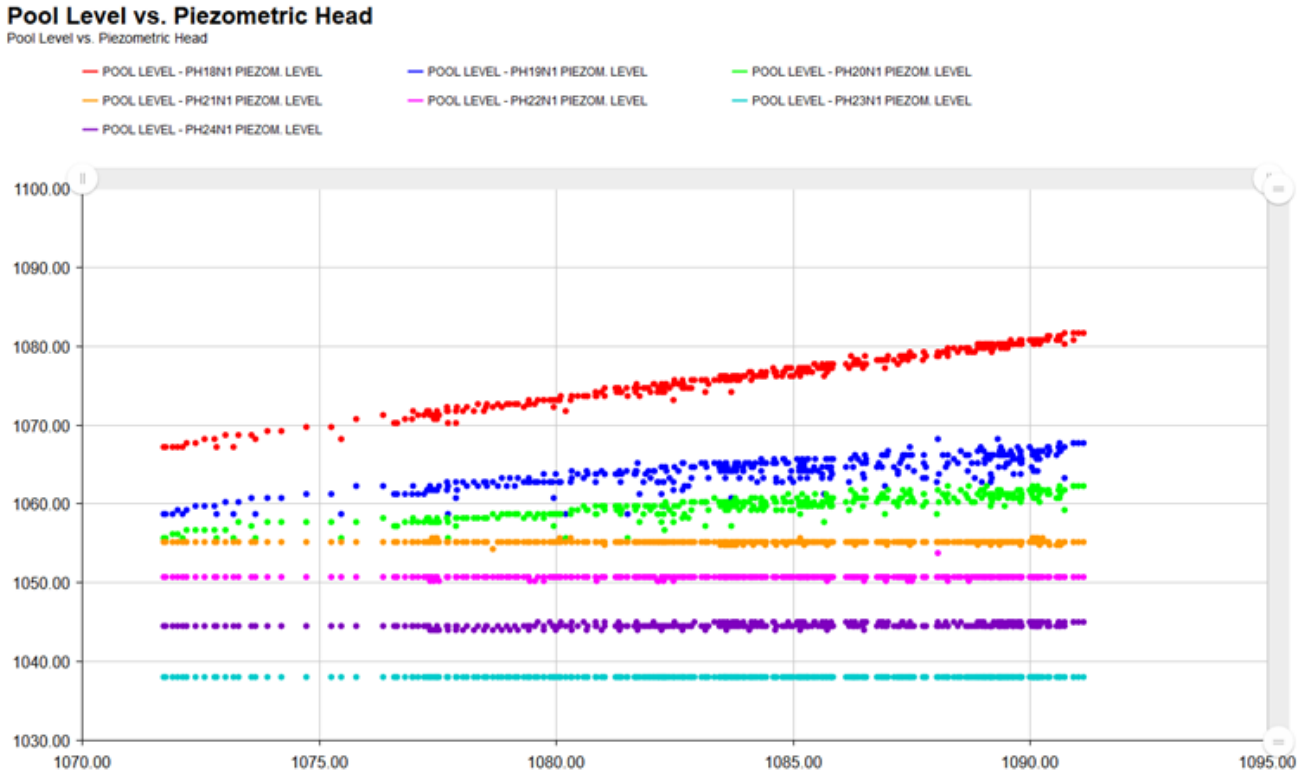
Noen hensyn å ta ved tolkning av poretrykksdata for norske dammer er følgende:

- For å sammenligne poretrykk på forskjellige piezometere, bør piezometrisk nivå beregnes, og i noen tilfeller også den hydrauliske belastningen i prosent i forhold til reservoarnivået. Derfor er det nødvendig å vite installasjonshøyden.
- Forskjell i poretrykk mellom tilstøtende piezometere gir informasjon om den hydrauliske gradienten.
- Opptrykk under betongdammer og funksjonaliteten av dreneringslag kan sjekkes med piezometere.
- I diagrammet i Figur 46 nedenfor vises utvikling over tid for piezometrisk nivå/trykk målt inne i en dam. En kan tydelig se hvordan det hydrauliske trykket avtar fra oppstrøms (PH18N1) til nedstrøms side (PH24N1) og at verdier er under magasinnivået.



Figur 46 Piezometrisk nivå/trykk inne i damkroppen som funksjon at tid

I det neste diagrammet vises det hvordan magasinvannstanden påvirker utviklingen av piezometrisk nivå/trykk. En kan se hvordan piezometere som er installert nær oppstrøms side (PH18N1, PH19N1, PH20N1) samsvarer mere klart med reservoarnivået enn piezometere installert nær nedstrøms side.



Figur 47 Piezometrisk nivå/trykk (vertikalaksen) in damkroppen som funksjon av magasinnivå (horisontalaksen)

6.4 Bruk av overvåkningsdata for å få en bedre forståelse av tilstanden til en dam

6.4.1 Innledning

I dette avsnittet blir visjonen om damsikkerhet diskutert ved å forsøke å kombinere de typiske dambrudds- og faresituasjoner (avsnitt 6.2) med hvordan forskjellige måleresultater fra instrumenter arter seg. Både resultatmønstre som indikerer potensiell fare / bruddsituasjoner og de som utelukker dem blir drøftet. Noen typiske eksempler vises. Det fokuseres her på potensielle dambruddssituasjoner sett ut ifra den informasjon overvåkningsinstrumenter kan gi. Andre overvåkingsaktiviteter som visuell inspeksjon og tester berøres ikke i denne diskusjonen.

6.4.2 Mønstre som indikerer dambrudds- og faresituasjoner

Overtopping
I fyllingsdammer kan overtopping lettere føre til dambrudd enn tilfellet er med betongdammer dersom overflatematerialet til en fyllingsdam har liten motstandsevne mot dette. Det er mange grunner til at overtopping kan skje. Disse kan oppsummeres som følger (ikke utfyllende liste):

- Utilstrekkelig fribord
- Mangelfull flomløpskapasitet
- Undervurdering av flomstørrelser
- Ingen oppdatert informasjon tilgjengelig for dagens vannstand og forventet tilsig
- Foreldete rutiner for manøvrering av dammen
- Defekte flomløpluker eller tappeluker
- Setninger i damkrona

Norske fyllingsdammer er vanligvis steinfyllingsdammer med morene- eller asfaltkjerne eller med oppstrøms betongplate som vanntettingssjikt. De fleste av de norske steinfyllingsdammene er fundamentert på fast fjell. For rehabiliterte og nye dammer er komprimeringskravene dessuten godt spesifisert og utført. Spesielt gjelder dette for dammer hvor konsekvensene av et dambrudd vil være svært alvorlige. Derfor antas det at norske fyllingsdammer er mindre utsatt for setninger over tid.

Ekstrem flom, spesielt på grunn av klimaendringer, er en veldig aktuell trussel med hensyn til damsikkerhet i Norge. Imidlertid blir det generelt sett på som et design- og driftsspørsmål i stedet for overvåkningsspørsmål. Den mest nærliggende avbøtende tiltaket er å gjøre en oppdatering av designflom og tilhørende nødvendig flomløpskapasitet. Dette er hovedårsaken til at NVE i forhold til damsikkerhetsvurdering krever en oppdatert flomvurdering hvert 15. år. Dette sammen med periodisk inspeksjon og omfattende inspeksjon (revurdering) er viktige deler av et tilsynsprogram.

Likevel kan følgende forhold/fenomener som kan føre til overtopping bli oppdaget eller kontrollert med damovervåking:

- Setninger i damkroppen, spesielt damkrona (og topp tetning)
- Måling av magasinvannstanden i sanntid
- Installasjon av meteorologiske stasjoner og målestasjoner oppstrøms dammen (dette er ikke bare for damovervåking, men også for et hydrologisk informasjons- og prognosesystem)

Indre erosjon
Indre erosjon er en annen høyrisiko-faktor for en dam. Det kan forekomme i damkroppen av fyllingsdammer, damfundament og vederlag, overgangssoner og langs en tilhørende konstruksjon (f.eks. tappekulvert eller vange). Indre erosjon er en gradvis prosess som starter i det små og som kan

utvikle seg til et dambrudd. I praksis vil overvåking av instrumentering kunne muliggjøre tidlig oppdagelse av potensielle faresituasjoner slik at tiltak som reduserer risikoen kan bli satt inn.

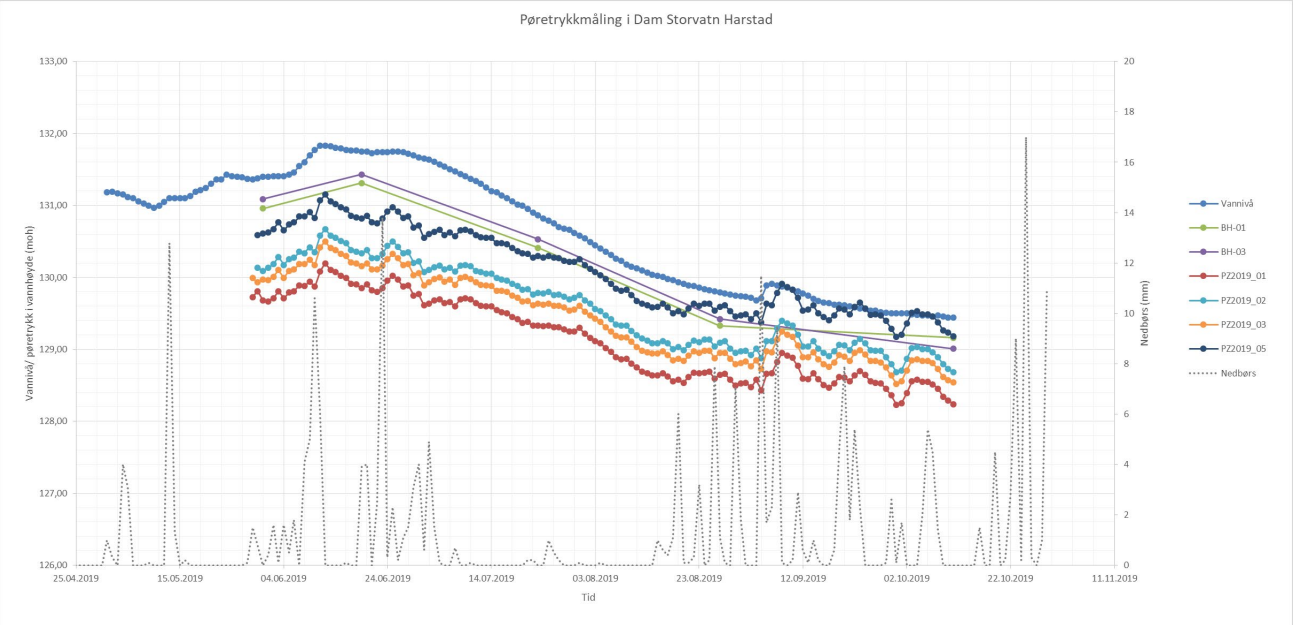
Følgende fenomener som kan føre til indre erosjon kan observeres med overvåkningssystemet:

- V-overløpsmålinger kan vise en irreversibel og betydelig av økning av lekkasjer over tid.
- Piezometere i damkroppen og fundamentet viser unormale forandringer. Disse kan være økt eller redusert poretrykk. Hydraulisk gradient mellom tilstøtende piezometere bør følges med på.
- Unormale endringer i målinger for totaltrykkceller.
- På et fremskredet stadium kan indre erosjon forårsake lokal kollaps av damkjernen. Dette kan føre til ytterligere setninger eller helningsrotasjons-glidning som kan oppdages med deformasjonsmålinger.
- Ved inspeksjon (eventuelt med installert turbidimeter) kan en observere lekkasjer, misfarget sigevann eller uklart og partikkelholdig avrenning på nedstrøms side av dammen. I mer alvorlige tilfeller kan sandholdig vann som bobler opp observeres.

Dam Storvatn Gausvik er en fyllingsdam som kan tjene som et eksempel. Der ble det observert lekkasje ved flomoverløpet i betong (Figur 48) under en inspeksjon. Høy permeabilitet ved damfundamentet og høyt poretrykk ved damfoten kunne observeres ved grunnundersøkelser og testing (Figur 49). Derfor ble piezometere installert. Høyt poretrykk i damfundamentet som var sterkt korrelert med oppstrøms reservoarnivå kunne måles. Lekkasjemålinger og deformasjonsmålinger var normale.

Dette er et typisk eksempel på at overvåkning av poretrykk bidrar til identifikasjon av en potensiell dambruddssituasjon i en tidlig utviklet fase, før tilstanden blir til en irreversibel dårligere tilstand.

Figur 48 Lekkasje og sporadisk misfarget lekkasjevann observert i flomløpskanalen (til venstre), høyt poretrykket (artesisk vann) observert i et borehull i damfoten (til høyre)

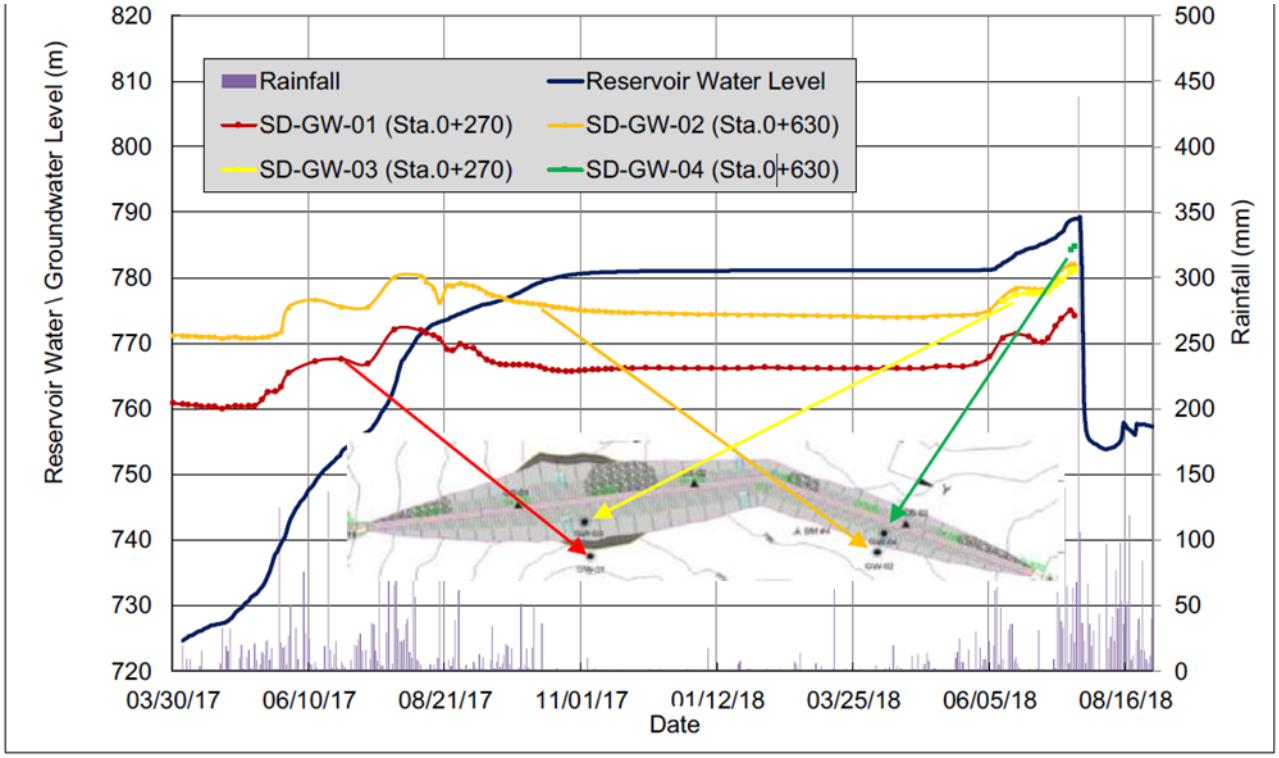


Figur 49 Stor grad av sammenheng mellom oppstrøms vannstand og piezometere installert i damsenter og damtå

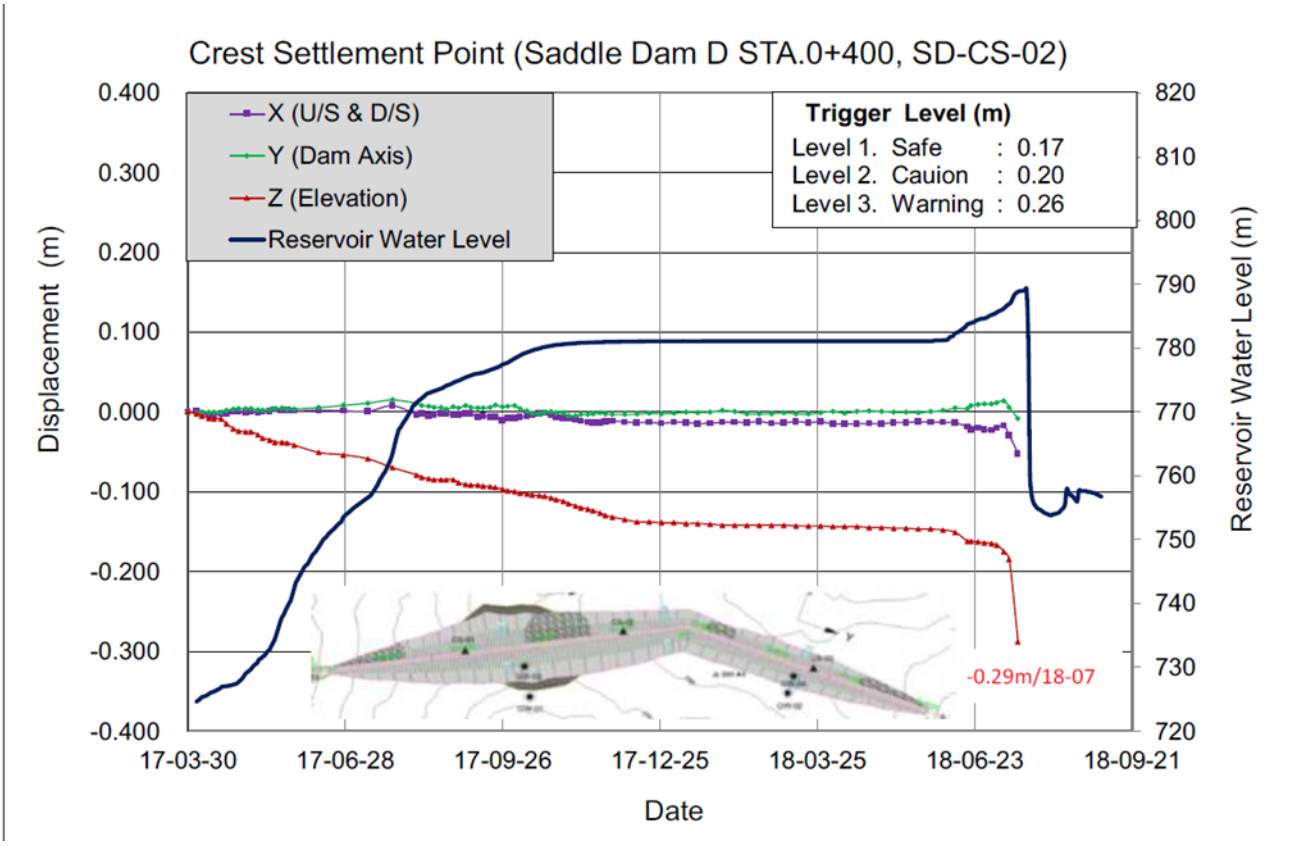
Kollapsen av Xe-Pian Xe-Namnoy-(XPXN-) prosjektets Sidedam D den 23. juli 2018 i Laos førte til at 40 mennesker døde mens 98 er savnet, og er et typisk eksempel [22][23]. Den sannsynlige årsaken til dambruddet er indre erosjon av damfundamentet. Poretrykket i piezometermålingene er generelt høye, og de er sterkt korrelert med oppstrøms magasinvannstand (Figur 49). Deformasjonen er sterkt korrelert med oppstrøms vannstand også (Figur 52).

Det skal sies at i tilfellet med XPXN-dambruddet ble terskelverdien for setninger (30 cm) overskredet 18. juli 2018. Dette vekket ikke oppmerksomheten til damingeniøren [23]. Historien har vist oss at overvåkningsdata har blitt tolket på feil måte eller oversett mange ganger, noen ganger med katastrofale konsekvenser.

Figur 50 Oversiktsbilde som viser dambruddet i Xe-Pian Xe-Namnoy Sidedam D [23]



Figur 51 Høyt poretrykk og høydepunkt korrelert med oppstrøms magasinvannstand, Sidedam D [23]

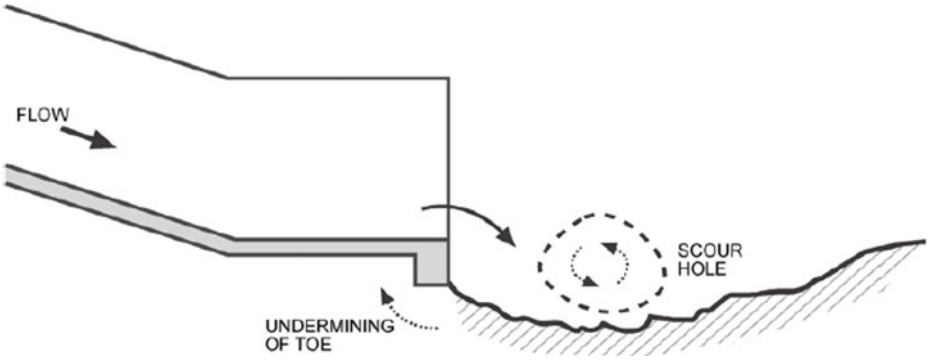


Figur 52 Setninger målt over de to siste månedene før dambruddet i takt med økningen av magasinvannstanden, Sidedam D [23]

Farer i forbindelse med hydrauliske konstruksjoner

En typisk risiko knyttet til hydrauliske konstruksjoner er tilstopping av flomløpet som fører til en reduksjon av avledningskapasiteten. Dette er svært relevant for norske dammer. Imidlertid er dette generelt mer et hydraulisk eller hydro-mekanisk designproblem enn et overvåkingsproblem. Den eneste praktiske anbefalingen er å sette opp et videokamera ved flomløpet, noe som spesielt er å anbefale for vanskelig tilgjengelige dammer eller dammer hvor det vanligvis ikke er driftspersonell til stede. Ved å benytte måling av vannstand kan en utløse en inspeksjon av flomløpet i etterkant av en overløpssituasjon.

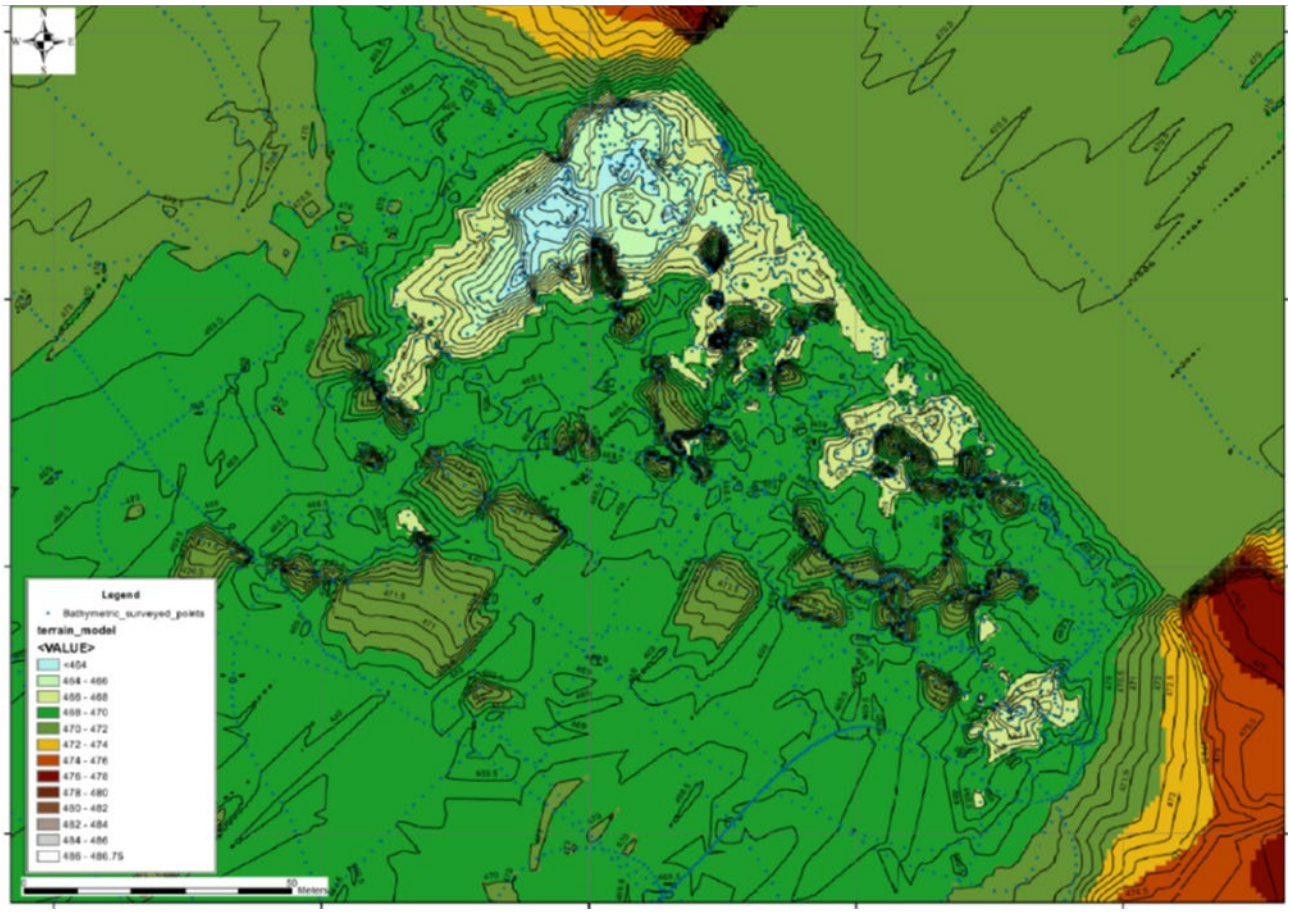
En annen type risiko som kan fanges opp av overvåkningsinstrumentasjonene er utilstrekkelig kapasitet for utløpskanaler og sedimentasjonsbassenger. En typisk prinsippskisse hentet fra Defra-rapporten [11] er vist i Figur 53.



Figur 53 Skisse som viser typisk erosjon og undergraving av damtå forårsaket av utilstrekkelig energidissipasjon [11]

Hullet som forårsakes av nedstrøms erosjon kan følges og fanges opp av batymetriske undersøkelser og målinger (Figur 53). Undergraving av damtå kan fanges opp ved deformasjonsmåling av pilarene. Figur 54 viser to prosjekter hvor erosjon ble oppdaget ut fra deformasjonsmålinger og deretter bekreftet ved bruk av batymetriske målinger (Figur 55). I tillegg til deformasjonsmålinger ble også en økning av poretrykket (opptrykket) observert i piezometerne som er installert i damfundamentet ved Isola Serfinidammen.

Figur 54 Isola Serfinidammen i Italia til venstre og Kamuzu Barrage i Malawi til høyre



Figur 55 Batymetrisk undesøkelse som viser erosjon nedstrøms av Kamuzu Barrage

Strukturell ustabilitet av betongdammer
Ustabilitet av betongdammer kan generelt lett fanges opp av deformasjonsmålinger. Utvikling av sprekker kan oppdages ved overflateinspeksjonen. Økningen i vannlekkasjer vil kunne oppdages og observeres i lekkasjemålesystemet eller i damfoten direkte, hvis den er eksponert. Øking av poretrykk/opptrykk kan også fanges opp av piezometere som er installert på damfundamentet.

For betongdammer med oppspente fjellankre er det viktig å overvåke spenningen på forankringene. Dette skjer i Norge ved å kontrollere oppspenningskraften ved hver revurdering, men det er også mulig å installere lastceller på det aktive ankeret for kontinuerlig overvåking.

Det finnes forskjellige typer deformasjonsmålinger for ulike deler av konstruksjonene (gallerier, damkroner, overflater, skjøter). Det er viktig å kombinere alle for å få et helhetlig overblikk over damstabiliteten. Figur 27 viser et eksempel på tre-dimensjonalt ekstensometer ("jointmeter").

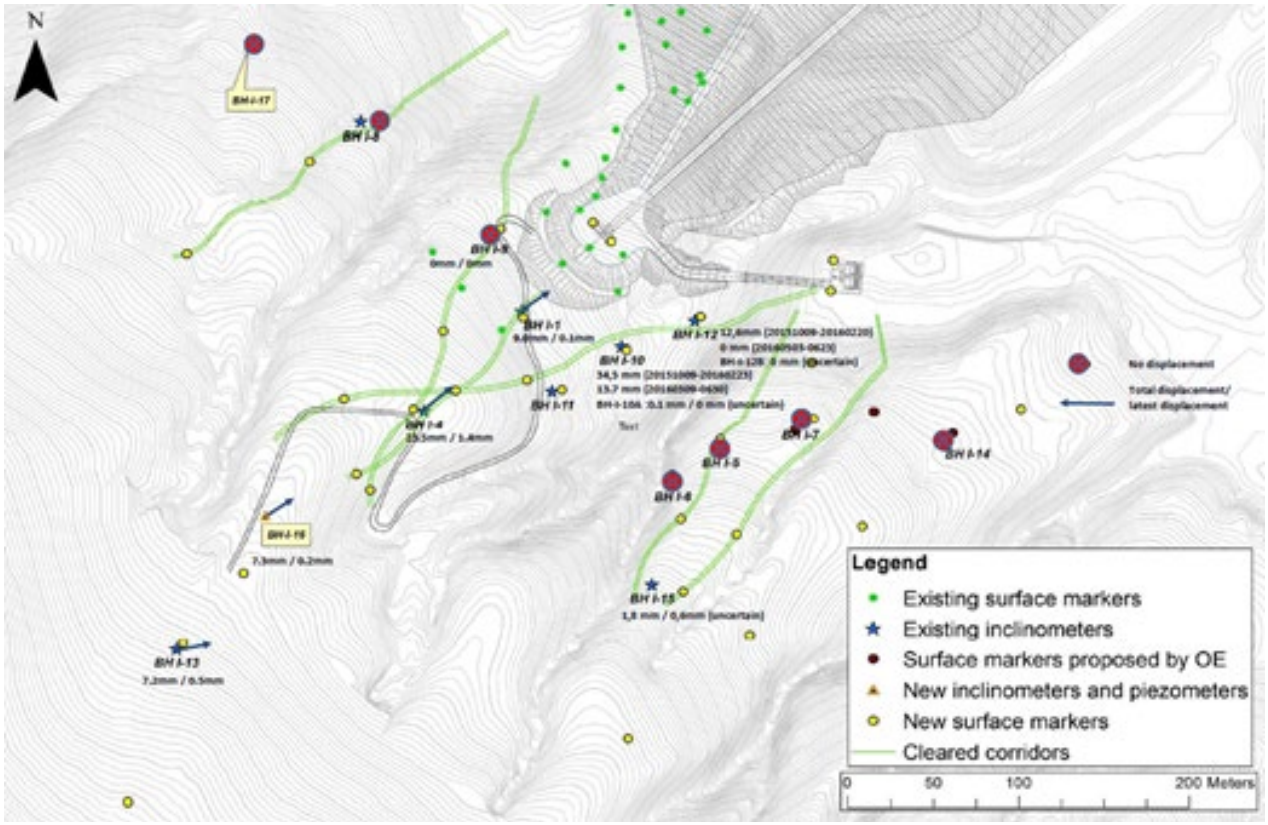
Is- og bølgepåvirkninger inkludert lokale tsunamibølger forårsaket av store skred
Is- og bølgepåvirkninger kan forårsake skader på demninger og er relevant for norske dammer. Ingen av disse vil normalt føre til problemer og strukturell svikt når det utføres et ordentlig inspeksjonsprogram. Inspeksjonsprogrammet som kreves i den norske damsikkerhetsforskriften er tilstrekkelig til å identifisere skader. Is- og bølgepåvirkninger er et godt eksempel på at visuelle inspeksjoner gir viktig informasjon og at overvåkningsdata bare spiller en sekundær rolle i disse tilfellene.

Skred kan imidlertid forårsake dambrudd. Et kjent eksempel er Vajont-dammen (også stavet Vaiont) i Italia. En stor flodbølge forårsaket av et skred ned i reservoaret overtoppet betongdammen og ødela

en landsby nedstrøms. Potensialet for store reservoarskred i Norge er lite, men relevant for norske dammer. Det er for eksempel listet opp under «relevante ulykkeslaster» i dsf. § 5-3 som «rasgenererte bølger» og «skred: last som følge av skred direkte mot vassdragsanlegg».

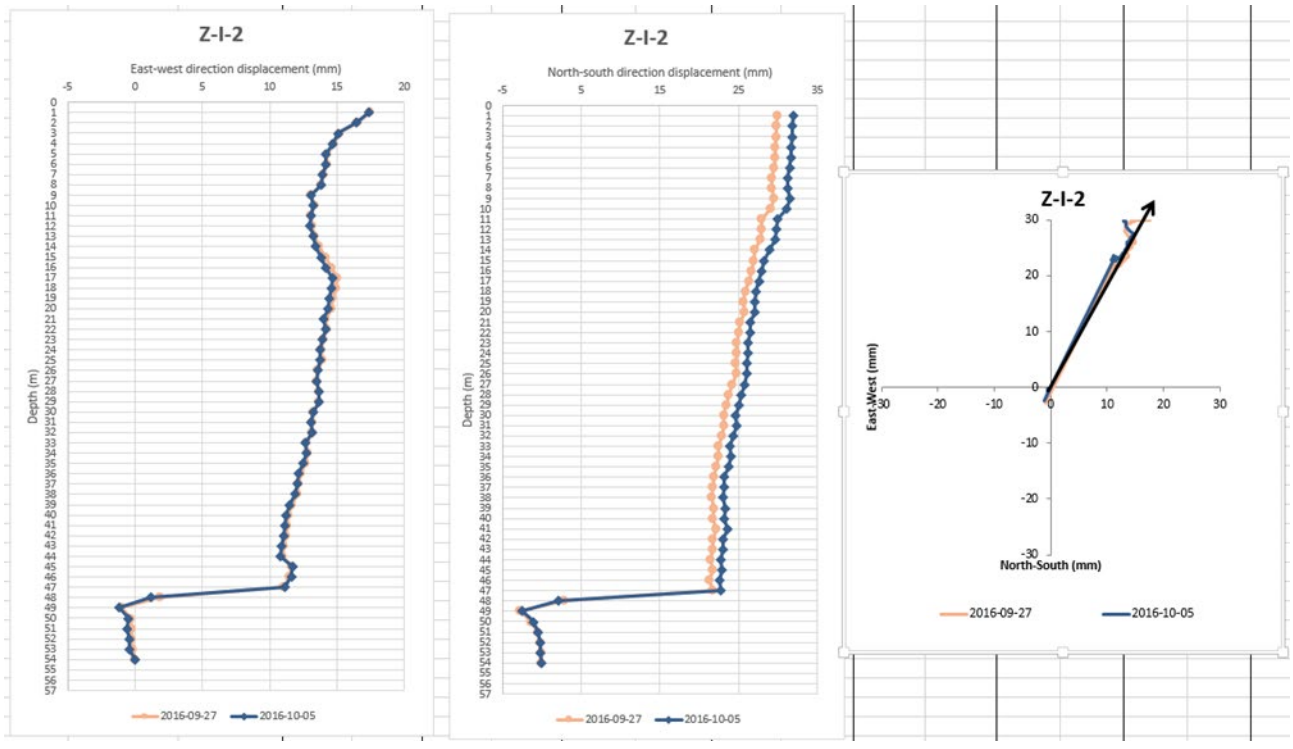
Banja-dammen i Albania representerer et vellykket eksempel på overvåkning av slik mulig fare under den kritiske første gangs oppfylling av reservoaret. På dammens venstre vederlag og i en annen skråning ble det observert kontinuerlig deformasjon i byggefasen. Et omfattende overvåkingsprogram inkludert inklinometre, piezometere og målebolter, ble gjennomført under den første kritiske magasinfyllingen med ukentlig rapportering av stabilitetsvurderinger i hele perioden.

Et eksempel på måling av helning og overflatemarkører er oppsummert i Figur 56 og Figur 57. Bevegelser målt med helningsmålere er vist i Figur 58. (Disse tre figurer er fra samme sted.)



Figur 56 Målingene fra inklinometer

Figur 57 Målingene fra målebolter



Figur 58 Typiske helningsmålinger som angir bevegelser

6.5 Anbefalinger om terskelverdier og pålitelighet

6.5.1 Anbefalinger for å fastsette terskelverdiene

Terskelverdier er vanligvis definert gjennom deterministiske modeller eller en statistisk evaluering av overvåkningsdata. Damsikkerhetsforskriften stiller krav om at grenseverdier for beredskap skal være basert på teoretiske beregninger av vassdragsanleggets kapasitet (dsf. § 7-4, jfr. § 7-2).

Under byggefasen og første magasinfylling er det ingen representative overvåkningsdata tilgjengelige, og derfor brukes deterministiske modeller eller empiriske verdier fra lignende anlegg.

I driftsfasen er statistiske modeller enklere å bruke så snart en representativ tidsserie med overvåkningsdata, inkludert forskjellige lastscenarier, er tilgjengelig. Disse er tilgjengelige etter en viss tid inn i driftsfasen.

Fordelen med statistiske modeller er at de er basert på data fra installerte sensorer og inkorporerer derfor reelle forhold som ikke kan defineres ved deterministiske modeller. I tillegg er de lettere å utvikle og kan beregnes med tradisjonell programvare.

I dette avsnittet presenteres utfordringer med å utarbeide deterministiske modeller.

Det kan også nevnes at deterministiske modeller kan gi mer presise resultater når de er kalibrert med reelle overvåkningsdata.

Deformasjonsmålinger
Som omtalt i avsnitt 0, er det vanskelig og ofte usikkert å komme fram til en utløsende verdi som direkte fører til en bestemt handling. Imidlertid bør en terskelverdi brukes for å informere damingeniøren om enhver uventet utvikling av overvåkningsdata. Denne informasjonen vil hjelpe vedkommende til å foreta en vurdering av dammens sikkerhetsnivå og til å bestemme seg for eventuelle påfølgende forbedringstiltak.

I henhold til avsnitt 6.3.1 anbefales det generelt ikke å etablere deformasjons-utløserverdier ved kompleks analysemetode for deformasjonsmålinger. Det anbefales derfor å etablere terskelverdiene ved praktisk empiriske eller statistiske metoder kombinert med god forståelse av dammenes stabilitet.

For eksempel ved en fyllingsdam kan man starte med erfaring - den empiriske endelige setningen av en godt komprimert fyllingsdam er omtrent 0,5 % -1 % av damhøyden.

- Man følger med i setningene for å se hva som er "normalt" for den aktuelle dammen (også sett i forhold til konstruktørens antakelser om setningshastighet). Før setningene totalt når bekymringsnivå sett i forhold til fribord – som må anses mer som en hydraulisk forutsetning enn en geoteknisk forutsetning – er det setningshastigheten og endringer i denne som er av mest interesse, jf. Figur 39 og Figur 40: Avtar setningene over tid eller akselererer de?
- Terskelverdiene bør oppdateres og justeres gradvis under driftsfasen ved å vurdere de nyeste overvåkningsdataene.
- De første tiltakene ved tegn på overskridelser kan være intensivering av overvåkingen, for eksempel ved å utføre visuell inspeksjon og ta hyppigere avlesninger.
- Videre bør det tas et helhetlig overblikk av damsikkerheten.

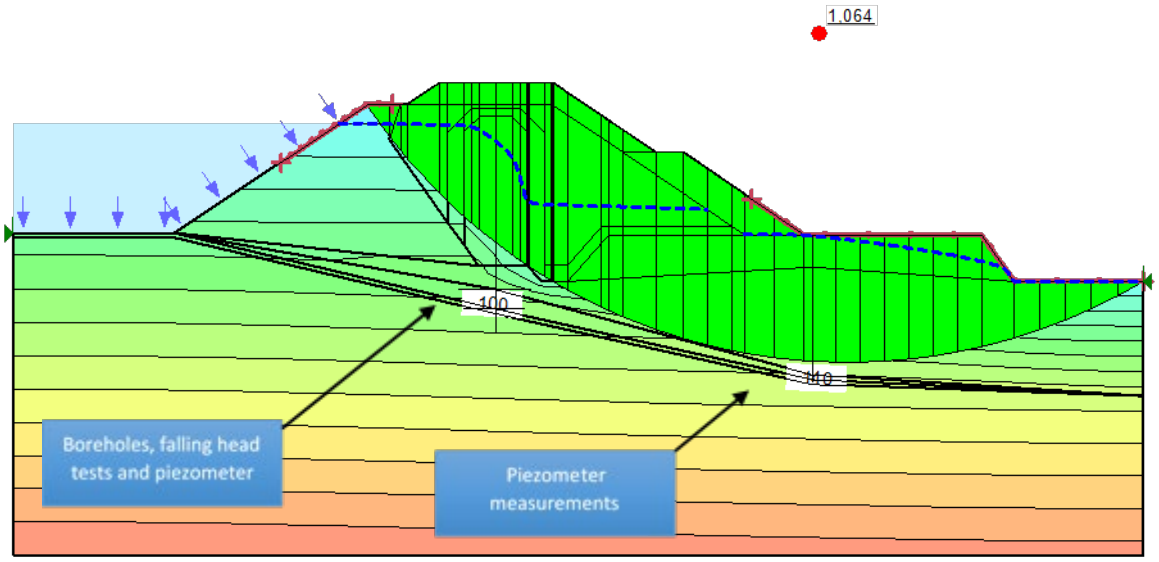
Lekkasjemålinger
Som omtalt i avsnitt 6.3.2, anbefales det generelt ikke å etablere en lekkasjeterskelverdi ved en kompleks analysemetode. Imidlertid bør en terskelverdi brukes for å informere damingeniøren om

enhver uventet utvikling av overvåkningsdata. Denne informasjonen vil hjelpe ham til å foreta en vurdering av dammens sikkerhetsnivå og til å bestemme seg for eventuelle tiltak. Følgende punkter bør tas med å betraktning for å komme fram til en terskelverdi:

- Terskelverdiene bør oppdateres og justeres gradvis under driftsfasen ved å vurdere de nyeste overvåkningsdataene. Dette kan praktisk gjøres ved at det estimeres en viss prosentandel av toppverdien over de siste årene, når en dams oppførsel er kjent og har stabilisert seg.
- I fyllingsdammer skal en huske på at den totale lekkasjen er relatert til dammen og fundamentets permeabilitet. De blir vanligvis estimert med en usikkerhet i størrelsesorden én tierpotens opp eller ned. Høy nøyaktighet av terskelverdien bør ikke forventes fra deterministiske modeller.
- Videre bør et helhetlig overblikk av damsikkerhet tas i med betraktning.

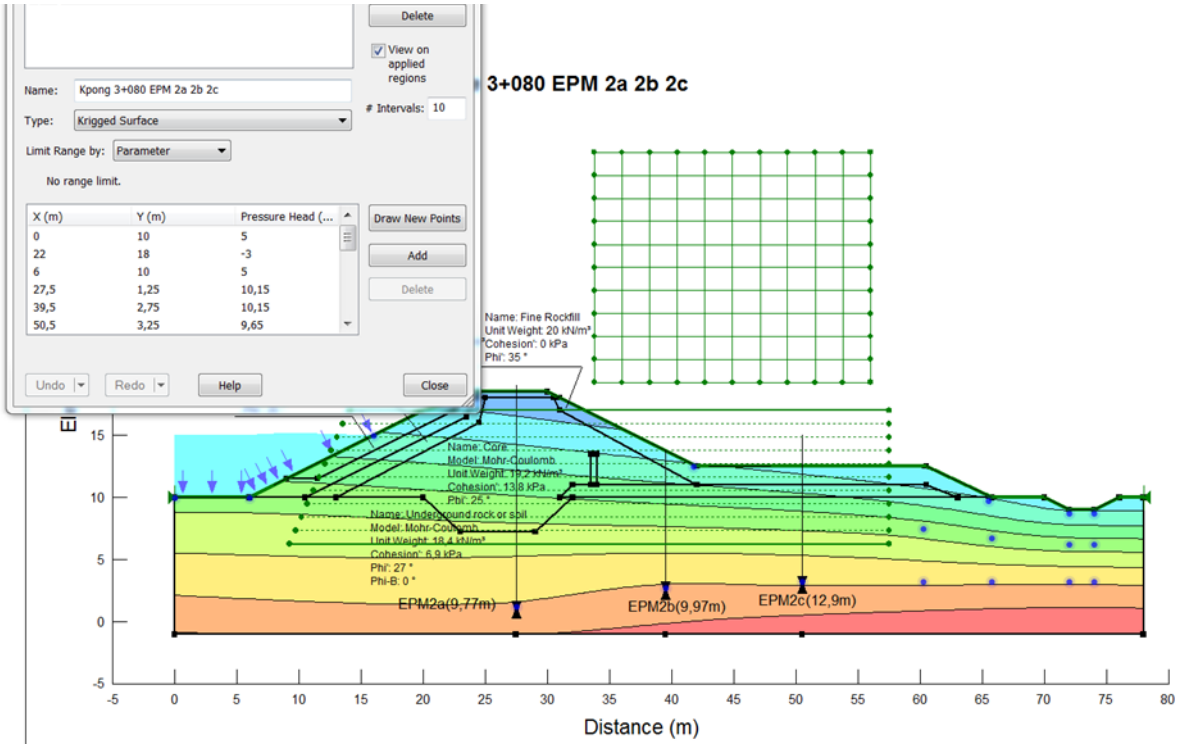
Måling av poretrykk
Som omtalt i avsnitt 6.3.3 kan terskel- eller utløserverdier etablertes relativt pålitelig ved analysemetoden for poretrykksmålingene. Skråningsstabiliteten i fyllingsdammer er i stor grad følsom for poretrykket.

Følsomhetsanalysen kan utføres på grunnlag av sammenholdte sigevann- og stabilitetsanalyser (eksempel som vist i Figur 59). Hensikten med sigevannsanalysen er å gi et estimat av poretrykksfordelingen som et grunnlag for stabilitetsevalueringen. Som et resultat kan forholdet mellom poretrykket og sikkerhetsfaktoren etableres.



Figur 59 Poretrykktilstand etablert ved sigevannsanalyse

Imidlertid er sigevannsanalyse ikke den eneste metoden for å beregne poretrykket. Poretrykket kan også beregnes med andre metoder, så som å trekke opp en vannsigs- eller metningslinje (linje som skiller den vannmettede og umettede delen av damkroppen) eller romlige fordelingsfunksjoner. Et eksempel på poretrykk bestemt fra den romlige fordelingsfunksjonen er vist i Figur 60.



Figur 60 Poretrykk etablert ved romlige fordelte funksjoner

Terskel- eller utløserverdien for piezometermålinger kan etableres ved hjelp av analysemetoder, men følgende begrensninger må tas i betraktning:

- Analytiske metoder krever at ingeniøren har tilstrekkelig geoteknisk informasjon og gjør en riktig tolkning av for eksempel grunnundersøkelser, felt- og laboratorietester. Det gir ingeniøren et grunnlag for interpolering av poretrykktilstanden.
- Avhengighet av utviklingen i reservoarnivået og lang responstid i materiale med lav permeabilitet må vurderes.

Dette viser at det også er viktig å etablere et helhetlig syn på damsikkerheten, inkludert hele tilsynsprogrammet.

6.5.2 Pålitelighet

Det er viktig å etablere en pålitelig oversikt over damsikkerheten. Med andre ord, alle påviste avvik bør være godt forstått, selv om de ikke i seg selv utgjør en fare for damsikkerheten. Dermed kan en unngå feiltolkning av viktige faremomenter på grunn av distraksjoner forårsaket av ukjente anomalier.

Det er for tiden en tendens innenfor forskningsfeltet til å bruke maskinlæringsteknologi for å danne seg et overblikk av damstabiliteten. Det endelige målet for maskinlæringsteknologien er å la kunstig intelligens vurdere damsikkerhet. Noen skrivebordstudier har blitt gjennomført med positive resultater, noe som kan være et alternativ i nær fremtiden.

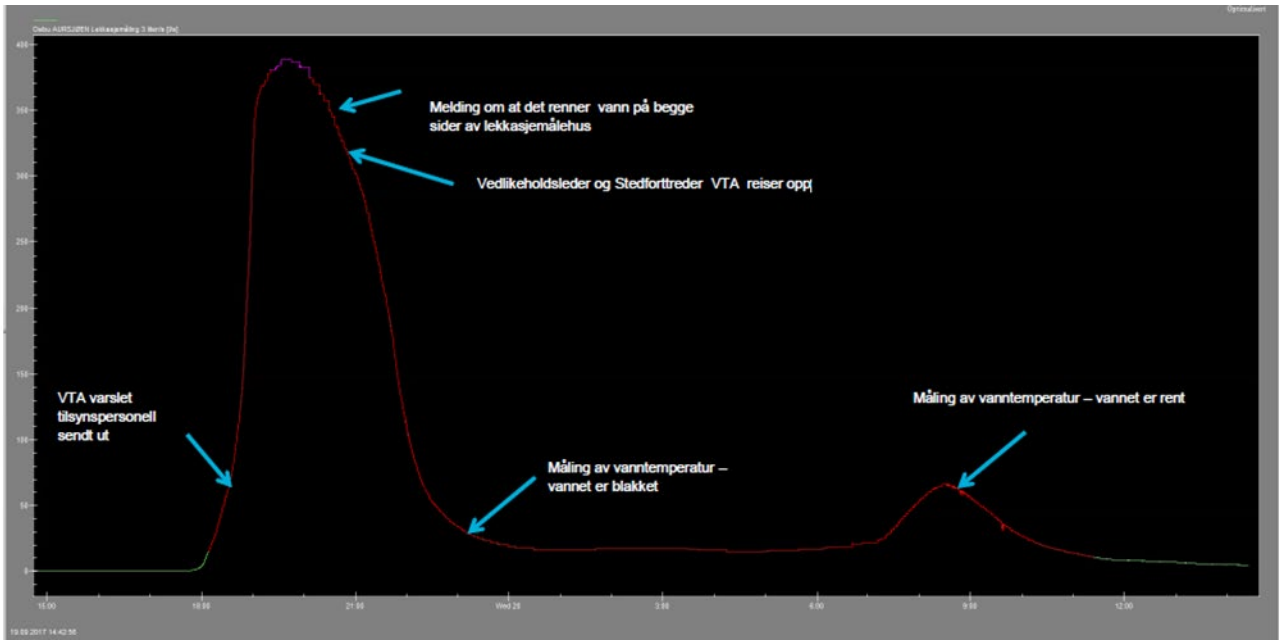
I norske dammer er det blitt oppdaget avvik som etter videre undersøkelser kan identifiseres som ikke-potensielle dambrudds farer:

- Reduksjon i sigevannsstrøm på grunn av blokkering, spesielt av is om vinteren (Figur 61).
- Øking av lekkasjemengden forårsaket av snøsmelting eller sammenbrudd av isbarrièrer som har dannet seg.

- Høye poretrykksmålinger på grunn av høyt nedstrøms vannstand eller grunnvannstand.

Figur 61 Reduksjon av lekkasjemåling på grunn av isblokkering i systemet

Et stort "lekkasjevolum" forårsaket av snøsmelting er en typisk anomali for norske dammer. Noen ganger kan enda større lekkasjevolum være forårsaket av sammenbrudd av isbarrièrer. Et typisk eksempel på en slik tolkning er en hendelse som skjedde på Aursjødammen 17. september 2017.



Figur 62 Registrert lekkasjevolum under Aursjø-hendelsen

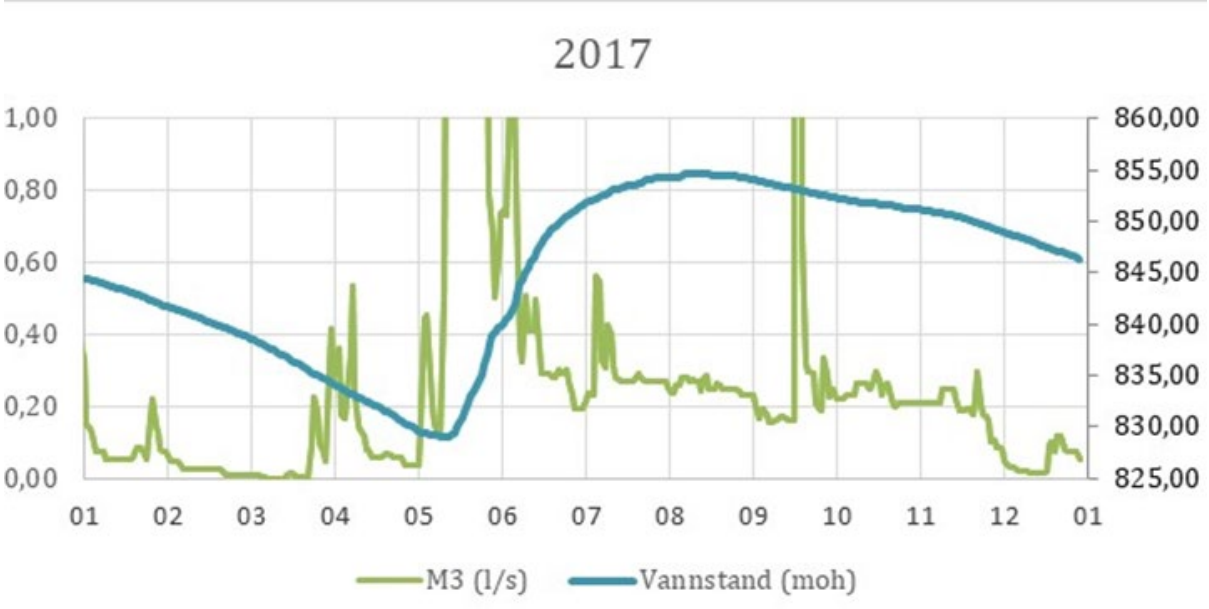
Dammen er en 40 meter høy steinfyllingsdam ned oppstrøms betongplate. Nedenfor dammen er det en veifylling og lekkasjemålehus 3 befinner seg lenger nedenfor veifyllingen. Dammen har en forhistorie med lekkasjer, og et nytt eksternt automatisk lekkasjemålesystem ble installert i 2005-2007. Under lekkasjehendelsen i september 2017 ble grenseverdien (utløserverdien) 70 l/s overskredet klokka 18:30. Nødinspeksjon ble gjennomført, og klokka 21:00 nådde lekkasjen et toppnivå på omtrent 380 l/s. Ved 22:30-tiden sank den totale lekkasjen raskt til under 70 l/s og gikk ned til normalt nivå på 24 timer. Det totale lekkasjevolumet ble beregnet til rundt 5000 m^3.

Etter hendelsen ble lekkasjemålingene undersøkt. Lekkasjedataene ble sammenlignet med oppstrøms vannstand, temperatur, nedbør og snødybde (Figur 63 og Figur 64) de siste årene. Vanntemperaturen under hendelsene ble målt under inspeksjonen.

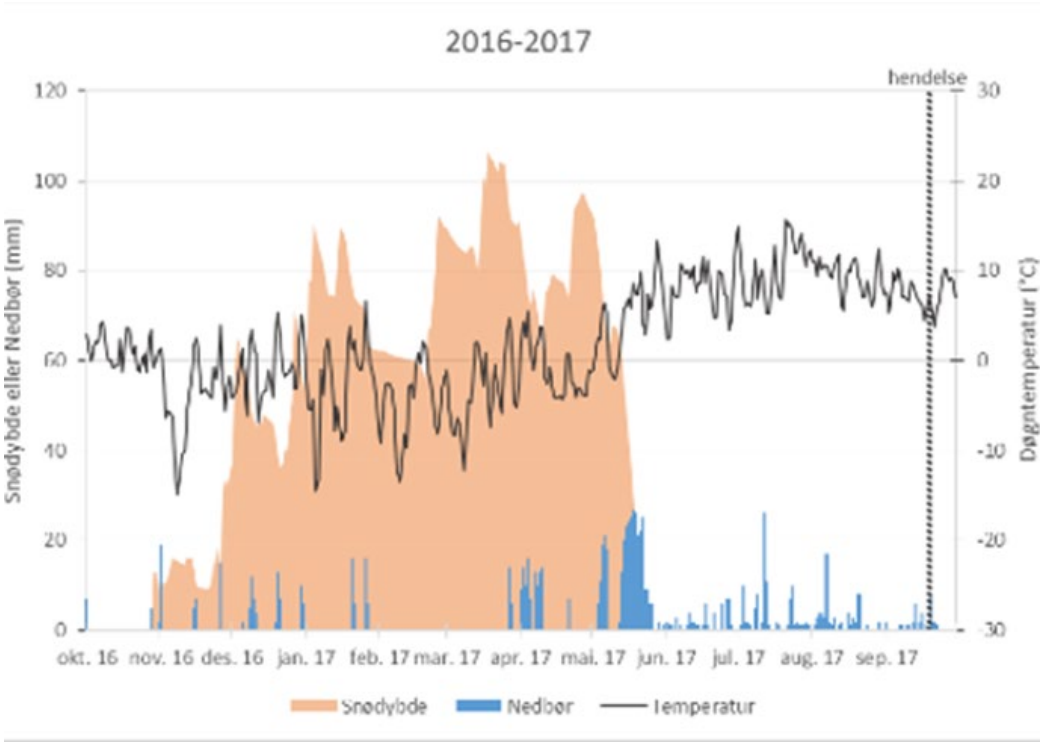
Til slutt ble den store lekkasjen tolket som at vannet som var demmet opp i veifyllingen nedstrøms av en isbarrière plutselig hadde blitt sluppet løs da isbarrièren brøt sammen. Det var således ikke relevant å forklare denne episoden med indre erosjon. Argumentene som støtter en slik tolkning er følgende:

- Lekkasjen gikk tilbake til normalt nivå 24 timer etter hendelsene. Rent vann ble observert.
- Lekkasjevannet hadde en temperatur på rundt 0 grader. Vannet i reservoaret varierte fra +4 til +8 grader.
- Det var ingen sammenheng mellom lekkasje og oppstrøms vannstand, nedbør, snødybde, temperatur og deformasjonsmålinger.
- Det ble anslått at det var tilstrekkelig med plass inne i veifyllingen til at 5000 m^3 vann kunne demmes opp.
- ROV-inspeksjon ble utført av dammen oppstrøms. Ingen betydelige sprekker i betongplaten ble observert.
- Den totale nedbøren i nedslagsfeltet for lekkasjemålehus 3 ble plottet mot de faktiske lekkasjemålingene der (Figur 65). Dette viste at etter høyere lekkasje enn forventet i 2008, ble det målt lavere enn forventet lekkasje i 2009-2011, og deretter ble en betydelig stor lekkasje målt i 2012. Det samme mønsteret gjentok i tidsrommet 2013-2017. Dette indikerer at den store lekkasjen som skjedde i 2017 kan skrive seg fra det vannet som hadde blitt demmet opp siden 2013.

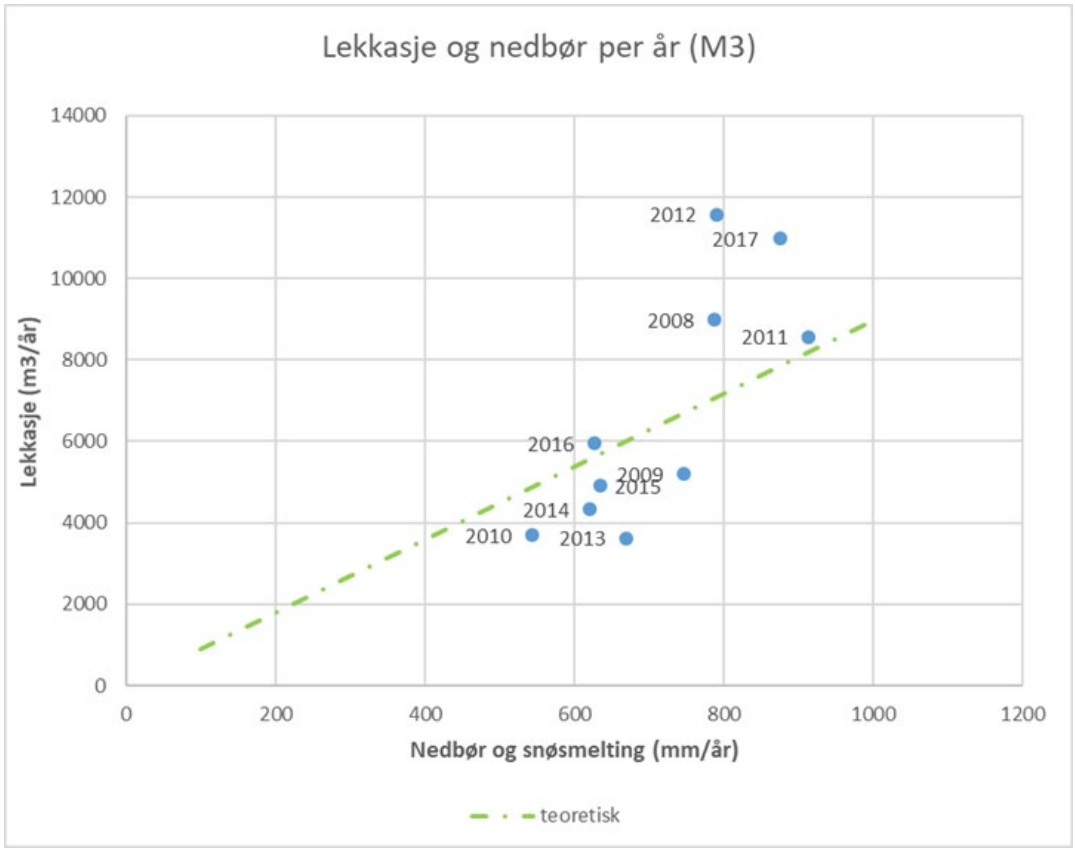
En tilsvarende hendelse skjedde for øvrig også tidligere ved Songadammen i 2010.



Figur 63 Lekkasje i lekkasjemålehus M3 plottet mot oppstrøms vannstand (Aursjøen)



Figur 64 Snødybde plottet mot nedbør og temperatur (Aursjøen)



Figur 65 Total nedbør i nedslagsfeltet for lekkasjemålehus M3 plottet mot de faktiske lekkasjemålingene som ble foretatt (Aursjøen)

Følgende lærdom kan tas av disse eksemplene:

- Tolkningen av data fra instrumenteringen må kombineres med andre tekniske detaljer og observasjoner for at en skal kunne skaffe seg et helhetlig inntrykk damsikkerheten.
- Det er veldig nyttig å benytte seg av et verktøy som gir mulighet til å plotte forskjellige typer målinger mot hverandre.
- Utløserverdien var i dette tilfellet ikke relatert til en situasjon hvor dambrudd kan oppstå. Men det er veldig viktig å varsle damingeniøren slik at visuelle inspeksjoner kan utføres, noe som kan være til stor hjelp i datatolkningen senere.

For øvrig observeres at både instrumenteringen og dameierens tette oppfølging, registreringer og analyse av hendelsesforløpet og grensebetingelsene ga et meget godt grunnlag for å konkludere årsaken til fenomenet og at det ikke forelå indre erosjon med potensielt store rehabiliteringskostnader.

6.5.3 Spesielt om bruk av dynamiske eller faste utløser- eller terskelverdier

Dynamiske verdier defineres som parametere (dvs. målbare verdier "terskelverdier", "grenseverdier", "utløserverdier") som utløser en viss handling, hvor den aktuelle parameterens verdi varierer i forhold til omstendighetene. Disse "omstendighetene" er i sin tur et sett av målbare verdier – inkludert boolske (enten/eller verdier)[4] – i vårt tilfelle relatert til dam, magasin eller omgivelsene, med tilhørende tidsstempel.

I sin enkleste form kan dette være en verdi for lekkasjen i en fyllingsdam hvor terskel- eller utløserverdien avhenger av magasinvannstanden.

I tidligere seksjoner (for eksempel 5.5.4) er det argumentert for at det kan være vanskelig å fastsette en "akseptabel" sammenheng mellom lekkasje og vannstand ut fra et teoretisk grunnlag, en pragmatisk holdning med å justere sammenhengen ut fra erfaringsdata kan være en bedre metode: Avvik fra "normal" (dvs. tidligere) oppførsel kan brukes til å fastsette utløser- eller terskelverdier, dette krever bl.a. en grundig statistisk analyse av tilgjengelige data. Det er ofte ønskelig å utvide settet av variabler som inngår i fastsettelse av verdier – i vår eksempel med fyllingsdam starter vi med en tabell eller funksjon hvor utløser- eller terskelverdien for lekkasjemåling avhenger av magasinvannstanden. Et større sett med variabler for å oppdage indre erosjon i en fyllingsdam med morenetetning kan inkludere:

- Lekkasjemåling
- Måling av magasinvannstanden
- Piezometermålinger i damkroppen
- Nedbør
- Turbiditetsmåling av lekkasjevannet
- Temperaturmåling:
    - luft
    - magasin
    - lekkasjevann

[4] Boolske algebra har variabler som kun kan ha to tilstander eller verdier: Vanligvis referert til som SANT eller USANT. De logiske operasjonene OG, ELLER og IKKE kan utføres på disse variablene. Etter George Boole, engelsk matematiker 1815-1864. Fritt etter Wikipedia.

Alle disse registreringer må gis et tidsstempel, og endringer over tid (endringsrater) kan beregnes og brukes som parametere for å bestemme terskel- og utløserverdier. Hvorvidt vannstanden er på vei opp eller ned vil også være en viktig opplysning. Man kan også sammenlikne forskjellige sensorer av samme type, f.eks. hvorvidt piezometere i forskjellige snitt reagerer likt eller ulikt ved endringer i magasinvannstanden.

Det kan alltid tenkes tilfeller hvor ytterligere informasjon (måling) vil være interessant. Til syvende og sist må damingeniøren bestemme seg for hvilke parametere som vil være styrende og nødvendige, basert på hva som er praktisk mulig både mht. datainnhenting, databehandling og presentasjon. Et godt overvåkingssystem vil hjelpe til med dette, men brukerens kunnskaper og forståelse av dammen vil være avgjørende for å utarbeide, drifte og forstå overvåkingssystemet.

Faste terskel- og utløserverdier er i enkelte tilfeller både lettere å fastsette og tolke. Et eksempel kan være en betong gravitasjonsdam på fjell, hvor beregningsmessig stabilitet mot velting og glidning kun er avhengig av magasinvannstanden. Hvis alle beregningsparametere aksepteres (geometri, friksjon, opptrykksform) vil en bestemt vannstand tilsvare en viss sikkerhetsfaktor og en fast terskelverdi kan bestemmes – i dette tilfellet magasinvannstanden – og dermed gi en fast utløserverdi for tiltak.

Likevel, i dette enkle tilfellet ser man at f.eks. forutsetningen om opptrykket under dammen er en parameter som, hvis den måles, kan forbedre kvaliteten av stabilitetsvurderingen. For en slik dam er det lettere å beregne sammenhengen mellom poretrykk, magasinvannstand og sikkerhetsfaktor matematisk, og terskelverdier for en dynamisk overvåking kan fastsettes i forkant. Uansett bør det også for en slik dam også registreres historisk oppførsel for statistisk analyse av "normal" oppførsel og andre terskelverdier vurderes i lys av dette. Endringer fra tidligere oppførsel kan også være en indikasjon på at "noe" har skjedd.

7 Oppsummering og anbefaling

Formålet med damovervåking er å håndtere risiko ved dammen og redusere sannsynligheten for dambrudd gjennom tidlig oppdagelse av uønskede hendelser som potensielt kan lede til dambrudd. Dsf. § 7-2 stiller tydelig krav om at overvåking skal avdekke forhold som kan redusere anleggets sikkerhet. Instrumentering har en nøkkelrolle i damovervåkingen, men alltid sammen med andre tiltak som visuell inspeksjon og prøving av anleggene.

I denne rapporten blir forskjellige forhold vedrørende instrumentering presentert. Det understrekes at en perfekt instrumentering ikke alene reduserer risikoen hvis ikke måledata evalueres jevnlig og brukes aktivt i damsikkerhetsarbeidet. Det er derfor avgjørende å ha en effektiv forbindelse mellom datainnsamling, evaluering og beslutningstaking. Hensikten er å omdanne rå-data fra instrumenteringen til verdifull informasjon, samt å gi dameieren klar kunnskap om dammens virkelige oppførsel.

Mange forskjellige bestanddeler må tas i betraktning, spesielt måle-, kommunikasjons- og IT-teknologi samt prosesser for datainnsamling, evaluering, alarmering og rapportering, samt beslutningstaking. Videre må ikke betydningen av hverken den menneskelige faktor eller damforskrifter og annet relevant lovverk undervurderes.

For å heve damsikkerhetsnivået er det nødvendig å forbedre disse bestanddelene på alle måter og optimalisere disses integrering i informasjonsflyten.

Som en videreføring av denne studien – og tidligere initiativ fra Energi Norge – har vi følgende stikkord for emner, med kommentarer:

- Studien kan utvides med flere analyser av typiske brudd- og bruddforløps-mekanismer, relevant for norske dammer. Spesielt gjelder dette eksempler fra norske og utenlandske betongdammer av forskjellige typer.
- For fyllingsdammer er turbiditetsmålinger nevnt som et område som kan forbedres i norsk praksis. Eksempler på praksis kan hentes fra utenlandske dammer.
- Studien er fokusert på god internasjonal praksis, men med norske forhold i tankene. Det er mulig å utvide studien med å konkretisere / presisere bedre hva som spesifikt kreves (er hjemlet eller anbefalt) i det norske forskriftsverket (dsf., NVEs veiledere og retningslinjer).
- Ny teknologi gir nye muligheter, men også potensielt usikkerhet. Som eksempel, hva betyr framveksten av 5G-teknologi som gir mulighet for bedre kommunikasjon, men også potensielt større sårbarhet for eller ved feil.
- Kostnader til etablering, drift og oppfølging av instrumentering og overvåking er i liten grad vurdert. Erfaringstall fra forskjellige aktører som har etablert systemer på et «høyt nivå» kan søkes innhentet.
- Planer for instrumentering av en typisk betongdam og en typisk fyllingsdam, med fokus på utførelse og dokumentasjon i et i et 15-årsperspektiv (revurderingssyklus)

Som en avslutning anbefaler vi at dameiere som vurderer å etablere større, integrerte overvåkingssystemer innhenter erfaring fra etablerte brukere. Her kan Energi Norge spille en rolle som organisator eller kontaktpunkt mot utenlandske eiere som er interessert i å dele erfaringer. Norske konsulenter som arbeider internasjonalt kan også være en viktig medspiller. Det samme gjelder Den Norske Damkomitéen (NNCOLD) som gjennom sitt medlemskap i den internasjonale komitéen for store dammer (ICOLD) har en stor og god kontaktflate internasjonalt.

8 Referanser

[1] Energi Norge (2019), https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/
[2] Hovden, J., Rausand, M., Sten, T. og Ulleberg, T (1989),” Storulykker i Norge. En utreding for NTNF”. STF75 A89016 (ISBN 82-595-5411-9)
[3] Olje- og energidepartementet (2010), Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften)
[4] EBL (2000), Håndbok for etterinstrumentering av dammer (Publ. 466-2000) (NVK Vandbygningskontoret / Ivar Torblaa)
[5] Sweco (2018), Damhistorikk og instrumentering. Evaluering og dokumentering av eksisterende dammers sikkerhet.
[6] BKK (2018), Bruk av damhistorikk med eksempler fra BKK. BKK Produksjon AS
[7] ICOLD (2000), Bulletin 118 Automated Dam Monitoring Systems
[8] ICOLD (2009), Bulletin 138: Surveillance: Basic elements in a "Dam Safety" program
[9] ICOLD (2017), Bulletin 154: Dam Safety Management: Operation phase of the dam life cycle
[10] ICOLD (2011), Bulletin 158 Dam Surveillance guide
[11] Defra (2011), Modes of dam failure and monitoring and measuring techniques
[12] USSD (2013), Routing Instrumented and Visual Monitoring of Dams Based on Potential Failure Modes Analysis
[13] USSD (2013), Instrumentation Data Collection, Management and Analysis
[14] ANCOLD (2003), Guidelines on Dam Safety Management
[15] SPANCOLD (2000), Guías Técnicas de Seguridad de Presas - Auscultación de las Presas y sus Cimientos
[16] Federal Energy Regulatory Commission (2007), Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects: Dam safety performance monitoring program
[17] ICOLD (2018), Bulletin 180: Dam Surveillance, lessons learnt from case histories - draft bulletin
[18] NVE (2019), Veileder 3/2019 Overvåking av vassdragsanlegg
[19] RST Instruments Ltd. (2018), Monitoring Instrumentation for Dams, Hydropower, Irrigation and Energy projects https://www.rstinstruments.com/applications/dams.
[20] Energiforsk (2020), Datadrivna metoder för att detektera avvikande mätvärden inom dammsäkerhet
[21] ICOLD (1995), Bulletin 99: Dam failures statistical analysis.
[22] Wikipedia (2018), 2018 Laos dam collapse
[23] A.J. Schleiss, J.P. Tournier, A.F. Chraibi (2019), Failure of Xe-Pian Xe-Namnoy Project Saddle Dam D