

MÄTMETODER FÖR RÖRELSEÖVERVAKNING AV FYLLNINGSDAMMAR

RAPPORT 2022:861



Mätmetoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar

YURIY RESCHETIUK
MAJA RYLANDER
HEDWIG HAAS
RONNY ANDERSSON
BENNY MOHLIN
INGVAR EKSTRÖM

ISBN 978-91-7673-861-0 | © Energiforsk maj 2022

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

Förord

Tekniken för rörelseövervakning av dammar har gjort framsteg de senaste åren. I denna rapport redovisas en aktuell sammanställning av tekniker som kan användas för rörelseövervakning av dammar, både i dammen och på ytan av dammen.

Projektet har genomförts av Sweco med Maja Rylander som projektledare. I projektgruppen har även Yuriy Reschetiuk, Hedvig Haas, Ronny Andersson, Benny Mohlin och Ingvar Ekström deltagit. Projektets referensgrupp har bestått av Jonas Hammarsson (Fortum), Kerim Genel Waldenström (Vattenfall), Peter Viklander (Vattenfall), Carl-Oscar Nilsson (Uniper) och Daniel Sjöstedt (Skellefteå kraft).

Projektet har genomförts inom Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram med medverkan från industrin och Svenska kraftnät. Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Energiforsk

Sammanfattning

Rörelser kan övervakas hos fyllningsdammar för att upptäcka dammsäkerhetsproblem, t.ex. inre erosion i eller under dammkroppen eller stabilitetsproblem. De senaste åren har tekniken för rörelseövervakning gjort stora framsteg och intresset för mer heltäckande mätmetoder har ökat. I denna rapport redovisas en aktuell sammanställning av tekniker som kan användas för rörelseövervakning av dammar, både i dammen och på ytan av dammen. Ingen av de metoder som beskrivs i denna rapport kan ensam ge en heltäckande bild av de rörelser som en fyllningsdamm kan utsättas för. Istället bedöms den mest effektiva lösningen vara en kombination av olika metoder som ger största möjliga nytta i övervakningen och möjlighet till korsvalidering.

Rapporten fokuserar på följande områden:

Punktbaseade metoder för rörelsemätning

Här ingår traditionell avvägning och mätning med totalstation. Traditionell avvägning av mätdubbar är fortsatt den vanligaste metoden för rörelseövervakning på svenska fyllningsdammar på grund dess enkelhet, höga noggrannhet och långa livslängd. Mätdubbarnas läge och nivå kan även mätas med GNSS, en satellitbaserad inmätningssystem. Noggrannheten är i nuläget på cm-nivå men istället finns möjlighet till realtidsövervakning och tidig varning. Den senaste forskningstrenden inom punktbaseade metoder har varit utveckling av integrerade övervakningssystem. Kärnan i ett sådant system är en programvara som sköter kommunikation mellan ingående instrument för rörelseövervakning, databearbetning och analys. Programvaran har även olika larmfunktioner om kritiska tillstånd inträffar.

Ytbaserade metoder för rörelsemätning

Ytbaserade metoder genomförs som komplement till lokal övervakning i specifika punkter. Ytbaserad mätning kan både genomföras med fotogrammetri och med laser. Mätningar kan göras på marken eller med hjälp av olika flygfarkoster. Hittills har ytbaserade metoder använts i begränsad utsträckning på svenska fyllningsdammar men det finns en stor potential att använda dem alltmer.

Rörelsemätning i dammkroppen

Den vanligaste metoden för rörelsemätning i dammkroppen är inklinometer som installeras vertikalt genom dammen. Inklinometern har hög noggrannhet men en mätning tar relativt lång tid. SAA är en ny teknik där utredning pågår om SAA kan användas för att mäta rörelser direkt i befintliga grundvattenrör. Vidare kan rörelser eller töjning mätas med optofiberkabel, sättningsmätare eller extensometrar. Dessa tekniker används begränsat för rörelseövervakning i svenska fyllningsdammar.

Nyckelord

Fyllningsdamm, rörelse, övervakning, laserskanning, UAS, drönare.

Summary

Deformation monitoring can be used to detect internal erosion or instability of embankment dams. During the last years, there have been tremendous developments in the deformation monitoring technologies, accompanied by increased interest in more comprehensive survey methods. This report deals with the state-of-the-art in the techniques that can be used for monitoring dam movements, both inside the dam as well as on the surface. None of the methods, which are described in this report, can alone provide a reliable and comprehensive picture of the movements that can occur at an embankment dam. Instead, the most efficient solution is believed to be a combination of different methods, which is the most beneficial in the monitoring and gives the possibility for cross-validation.

The focus of the report is on the following fields:

Point-based methods for deformation monitoring

Point-based methods include traditional levelling and total station surveys. Traditional levelling of benchmarks is the most common method for deformation monitoring at Swedish embankment dams because of its simplicity, high accuracy, and long lifetime. The benchmarks can also be surveyed with GNSS, a satellite-based survey method. The accuracy is at present at centimetre level but instead there are possibilities for real-time monitoring and early warnings. The latest research trend in the point-based methods has been the development of integrated monitoring systems. The core in such a system is the software that takes care of the communication between the sensors, data processing and analysis. The software has different alarm functions if a critical state occurs.

Area-based methods for deformation monitoring

The area-based methods are complementary to the point-based methods. Area-based surveys can be carried out both with photogrammetry and laser scanning. The surveys can be performed on the ground or with the help from different aircraft types. So far, the area-based methods have been employed to a limited extent at Swedish embankment dams but there is a great potential for increasing their use.

Movements inside the dam

The most common method for deformation monitoring inside the dam is inclinometer, which is installed vertically through the dam body. Inclinometer measurements have high accuracy, but they are relatively time consuming. SAA is a new technique where there is an ongoing investigation whether SAA can be used for the detection of movements directly in the existing standpipes. Furthermore, movements in the dam can be measured with the fibre optic cable, settlement sensors or extensometers. The use of these techniques for deformation monitoring is limited at existing Swedish embankment dams.

Keywords

Embankment dam, movement, monitoring, laser scanning, UAS, drones.

Innehåll

1	Inledning	10
1.1	Introduktion	10
1.2	Mål och syfte	10
1.3	Avgränsning	11
1.4	Disposition	11
2	Behov av rörelseövervakning	12
2.1	Fyllningsdammar och rörelser	12
2.2	Riktlinjer för rörelseövervakning i RIDAS	12
3	Metoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar	13
3.1	Allmänt	13
3.2	Punktbaseade metoder för rörelsemätning	14
3.2.1	Avvägning	15
3.2.2	Totalstation	17
3.2.3	GNSS och pseudoliter	19
3.2.4	Automatiserad övervakning med integrerade system	22
3.3	Ytbaserade metoder för rörelsemätning	24
3.3.1	Markbaserad laserskanning	25
3.3.2	UAS-fotogrammetri och -laserskanning	27
3.3.3	Satellitbaserad (Interferometric) Synthetic Aperture Radar (InSAR)	32
3.3.4	Markbaserad SAR	34
3.4	Rörelsemätning i dammkroppen	36
3.4.1	Inklinometer	36
3.4.2	Extensometer	39
3.4.3	Sättningsmätare	41
3.4.4	Optisk fiber	41
3.4.5	ShapeArray (SAA)	41
4	Internationell utblick	44
4.1	Automatiserad övervakning	44
4.2	GNSS	45
4.3	Markbaserad laserskanning	46
4.4	UAS-fotogrammetri	48
4.5	InSAR och markbaserad SAR	50
4.5.1	InSAR	50
4.5.2	Markbaserad SAR	52
4.6	Sweco Nederländerna: Erfarenheter inom deformationsövervakning	53
5	Tillämpning av rörelseövervakning på svenska dammar	55
6	Val av övervakningsmetod	58
6.1	Allmänt	58
6.2	Ekonomiskt perspektiv	62

6.2.1	Etablering stomnät, inmätning totalstation och laserskanning, mindre damm	62
6.2.2	Etablering av stomnät och laserskanning, större damm	63
6.2.3	Etablering av stomnät och laserskanning, invändig i en damm	64
6.2.4	Automatisk övervakning med integrerade system	65
6.2.5	Laserskanning och UAS/drönarfotogrammetri med extern utförare eller i egen regi	66
7	Referenslista	67

1 Inledning

1.1 INTRODUKTION

Rörelser övervakas hos fyllningsdammar för att upptäcka eventuella dammsäkerhetsproblem, t.ex. inre erosion i eller under dammkroppen eller stabilitetsproblem. Exempelvis kan större rörelser i dammkroppen indikera stabilitetsproblem och en sättning på dammens krön kan bero på läckage i eller under dammkroppen.

Rörelser hos fyllningsdammar har traditionellt övervakats med mätdubbar i betongblock som placeras på dammkroppen och vars läge mäts in. På så sätt kan rörelser av mätdubben mellan olika mättillfällen övervakas och analyseras. De senaste åren har tekniken för rörelseövervakning gjort stora framsteg och intresset för mer övergripande mätmetoder har ökat hos dammägare. Med utvecklad teknik finns möjligheter att genomföra mer avancerade mätningar och analyser. Mätningar av rörelser på dammkroppen görs allt oftare med hjälp av drönare och satelliter medan studier pågår om rörelser i dammkroppen kan övervakas i befintliga vattenståndsrör.

I denna rapport beskrivs olika mätmetoder som kan användas för rörelseövervakning av fyllningsdammar. Den visuella inspektionen som kan genomföras av personal på plats vid dammen fyller dock en viktig roll. Samspelet mellan visuell inspektion och olika mätmetoder är något som ska beaktas vid utformning av ett övervakningsprogram. Modern teknik såsom flygfotografering ger bra möjligheter att inspektera olika delar av dammanläggningen ur ett helhetsperspektiv, medan den visuella inspektionen kan vara mest effektiv för att upptäcka exempelvis ett sjunkhål på dammkroppen.

En notis bör göras angående terminologi. I denna rapport används termerna "rörelse", "deformation" och "förskjutning". Med deformation menas, i facklitteraturen, de förändringar som ett objekt genomgår i sin form, dimension och läge (Horemuz, 2010). En deformation är därför ett mer omfattande begrepp än rörelse och förskjutning men i denna rapport används dessa tre termer i samma mening. Det finns olika typer av rörelser på fyllningsdammar t.ex. rörelser i plan och i höjd. Rörelser i höjd benämns "sättningar" i denna rapport.

1.2 MÅL OCH SYFTE

Syftet med studien är att ta fram en aktuell sammanställning av tekniker som kan användas för rörelseövervakning av våra dammar, både i dammen och på ytan av dammen. Studien fokuserar på att belysa de tekniker som används för rörelseövervakning i Sverige. För att ge en bredare bild av hur rörelser kan övervakas görs även en internationell utblick. I studien redovisas för- och nackdelar för olika metoder för rörelseövervakning och ett ekonomiskt perspektiv belyses.

1.3 AVGRÄNSNING

I det följande beskrivs instrumentering av fyllningsdammar för övervakning av rörelser. Specifik instrumentering för övervakning i byggfasen, första dämningen och de första driftåren behandlas inte. För ytbaserade metoder för rörelsemätning har studien begränsats till mätmetoder ovanför vattenytan. Ytbaserade metoder för rörelsemätning under vattenytan behandlas inte i denna rapport.

1.4 DISPOSITION

I föreliggande rapport ligger fokus på att beskriva olika tekniker för rörelseövervakning hos fyllningsdammar. I kapitel 2 förklaras kortfattat fyllningsdammars behov av rörelseövervakning och riktlinjer om rörelseövervakning behandlas. I kapitel 3 beskrivs olika tekniker som kan användas för rörelseövervakning uppdelade under avsnitten *punktbaserade metoder för rörelsemätning*, *ytbaserade metoder för rörelsemätning* och *rörelsemätning i dammkroppen*. I kapitel 4 görs en internationell utblick på ett antal utvalda tekniker. Vidare redovisar kapitel 5 ett antal erfarenheter från en dammägare för tillämpning av rörelseövervakning på fyllningsdammar. Slutligen sammanställs i kapitel 6 ett antal viktiga parametrar för de olika metoderna för rörelseövervakning och några exempel används för att belysa ett ekonomiskt perspektiv.

2 Behov av rörelseövervakning

2.1 FYLLNINGSDAMMAR OCH RÖRELSER

I ICOLDs (2019) Bulletin om dammövervakning beskrivs att rörelser och deformationer hos fyllningsdammar kan vara tydliga indikationer på stabilitetsproblem. Enligt ICOLD (2019) är det viktigt att rörelser som beror på instabilitet upptäcks tidigt för att problemet ska hinna avhjälpas.

Vidare beskrivs att rörelser hos dammkroppen även kan vara orsakade av vatten som rör sig, på eller inuti dammen. Vatten i dammkroppen kan ge inre erosion med sättningar i dammen som följd. Vatten kan även orsaka erosion av dammens yta vid stora flöden, kraftiga regn, snösmältning eller vid vågbrytning. I ICOLD (2019) beskrivs att erosion har en tendens att utvecklas snabbt, särskilt om erosionen är orsakad av flödande vatten. Rörelser kan även uppstå till följd av påverkan från is och tjäle eller snabba temperaturförändringar vilket kan orsaka ett förändrat klimat i dammen med rörelser som följd.

Foster, Fell et. al (2015) beskriver att instrumentering och övervakning av fyllningsdammar kan ge tidig varning vid utveckling av ovanliga eller osäkra rörelser i dammen. Foster, Fell et. al (2015) anser att rörelseövervakning på dammens yta är en av de viktigaste övervakningsmetoderna på fyllningsdammar. Mätning av deformationer i dammkroppen kan vara ett bra komplement till mätning på ytan beroende på dammens behov, storlek, konsekvenser vid dammhaveri mm (Foster, Fell et. al, 2015).

2.2 RIKTLINJER FÖR RÖRELSEÖVERVAKNING I RIDAS

I Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS TV9 fyllningsdammar (2020) beskrivs att en fyllningsdamms instrumentering och övervakning ska anpassas till anläggningens behov, specifika förutsättningar och dammsäkerhetsklass. En riskanalys bör genomföras och felmoder bör studeras för att avgöra hur mätningar bör genomföras och frekvensen för dessa. Riktlinjerna påpekar dock att hos vissa dammar är det inte säkert att det är relevant att övervaka rörelser, oavsett dammsäkerhetsklass, vilken en felmodsanalys kan användas för att utreda.

Riktlinjerna förklarar att rörelseövervakning hos dammens yta är av intresse för att upptäcka förändringar i dammen som kan uppstå som resultat av t.ex. sättningar, inre eller yttre erosion. För stora eller höga dammar är detta ett viktigt komplement till lokal övervakning i specifika instrumenteringspunkter för rörelseövervakning. Rörelseövervakning i dammens yta kan göras med t.ex. flygfotografering från låg höjd och fotogrammetrisk kartläggning, laserskanning från fast position eller drönare, eller rörelsemätning baserad på satellitdata. Dammslänter och anslutande naturlig mark under vatten skannas lämpligen med hjälp av ekolodsutrustningar (RIDAS, 2020).

3 Metoder för rörelseövervakning av fyllningsdammar

3.1 ALLMÄNT

Det finns ett flertal metoder för att mäta rörelser på ytan och i dammkroppen hos fyllningsdammar. I denna rapport fokuseras på följande metoder:

Punktbaserade metoder för rörelsemätning

- Avvägning
- Totalstation
- Global Navigation Satellite System (GNSS) och pseudoliter
- Automatiserad övervakning med integrerade system

Ytbaserade metoder för rörelsemätning (ovanför vattenytan)

- Markbaserad (Terrester) laserskanning
- Unmanned Aircraft System (UAS) -fotogrammetri och -laserskanning
- Satellitbaserad (Interferometric) Synthetic Aperture Radar (InSAR)
- Markbaserad Synthetic Aperture Radar (Markbaserad SAR)

Rörelsemätning i dammkroppen

- Inklinometer
- Extensometer
- Sättningsmätare
- Optisk fiber
- ShapeArray (SAA)

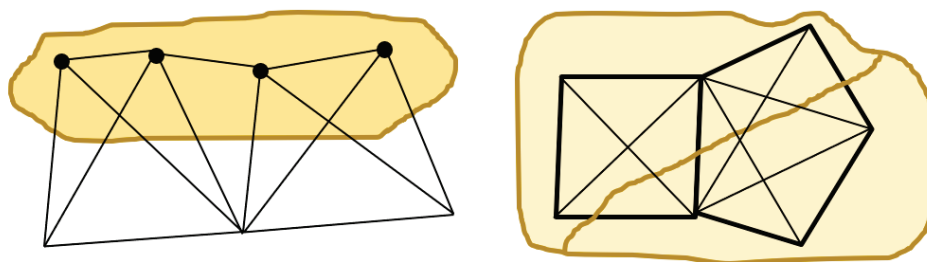
Vilken typ av metod för rörelseövervakning som används anpassas till fyllningsdammen behov, specifika förutsättningar, felmoder och dammsäkerhetsklass. Foster, Fell et. al (2015) beskriver dock några generella principer som bör tas hänsyn till vid val av övervakningsmetod:

- Mätning bör vara enkel
- Mätning bör vara känslig för att kunna upptäcka förändringar
- Mätning ska vara möjlig att verifiera och upprepa
- Mätning bör begränsas till ett antal nyckelmätningar som genomförs på noggrant utvalda platser på dammen
- Mätning som genomförs ska analyseras inom den närmaste tiden

3.2 PUNKTBASERADE METODER FÖR RÖRELSEMÄTNING

Foster, Fell et al. (2015) beskriver att regelbundna punktbaserade mätningar på fyllningsdammens yta kan vara en bra och enkel metod för att utvärdera status hos dammen. Vid användning av punktbaserade metoder mäts enstaka punkter på det objekt som övervakas vid två eller fler tillfällen och bestämmer rörelser i de specifika punkterna. Det är dock viktigt att punkterna har placerats på noggrant utvalda platser, så kallade "nyckelpositioner", som kan användas för att extrapolera beteende för hela objektet. Traditionellt etableras geodetiska nät för deformationsövervakning. I nätet finns tillräckligt många överbestämningar för att kunna utföra statistisk utvärdering av mätningarnas kvalitet och upptäcka rörelser på ett tillförlitligt sätt. Mätningarna vid varje tillfälle (en mätepok) utförs med väldigt låg mätosäkerhet och analyseras med avancerade metoder för att säkerställa att mätfel inte misstolkas som rörelser. I beräkningen av nätet (nätutjämning) finns inbyggda rutiner för detektering av grova fel. För att avgöra om en rörelse har skett mellan mätepokerna tillämpas statistiska metoder (hypotesprövning).

I nät för deformationsövervakning brukar vanligtvis ett antal punkter placeras på stabila ställen, utanför det objektet som övervakas, se Figur 3-1 till vänster. I detta fall kallas detta för ett referensnät för övervakningen och det är möjligt att bestämma absoluta rörelser i de punkter som ingår i nätet. Men ett övervakningsnät kan även utformas på så sätt att alla punkter placeras på objektet, vilket kallas för ett relativt övervakningsnät, se Figur 3-2 till höger. Syftet med sådan uppsättning är att identifiera en deformationsmodell baserat på upprepade geodetiska mätningar. Den här rapporten handlar om bestämning av absoluta rörelser.

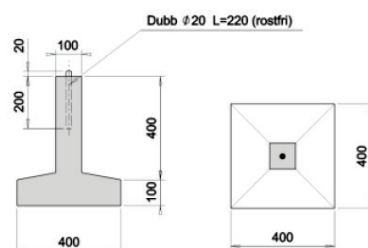
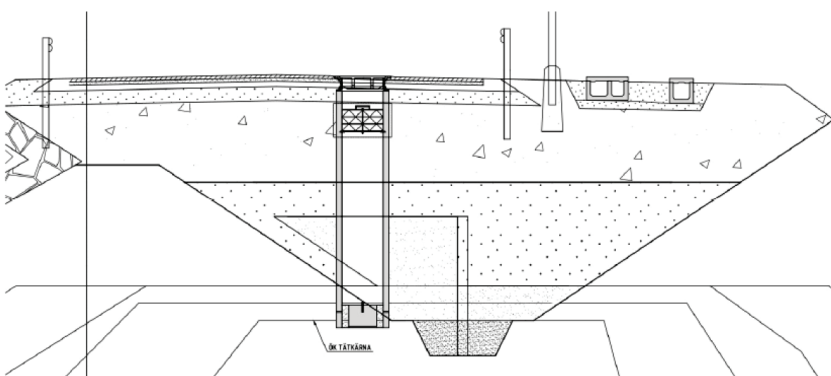


Figur 3- 1 Ett referensnät för deformationsövervakning. Till höger: ett relativt nät för deformationsövervakning.

En begränsning med punktbaserade metoder är att de är tidskrävande och ger deformationer i ett antal diskreta punkter på objektet, vilka sammanlagt ger en global deformationsstatus av objektet. Lokala deformationer mellan punkterna kan däremot inte upptäckas. Å andra sidan är dessa metoden mycket noggrannare än de ytbaserade metoder som avhandlas i avsnitt 3.3, vilket gör det möjligt att upptäcka väldigt små deformationer. Det som är viktigt att ha i åtanke vid användning av både punkt- och ytbaserade metoder är att mätosäkerheten bör vara maximalt ca 1/3 av en förväntad deformation för att tillförlitligt kunna detektera deformationer.

3.2.1 Avvägning

Den traditionella avvägningen som baseras på mätning av höjdskillnader mellan ett antal fixpunkter är idag den mest tillförlitliga metoden för bestämning av relativa höjdskillnader. Mätosäkerheten kan vara så liten som 0,2 mm/km (dubbelavvägning). Fixpunkterna brukar markeras med dubbar och installeras i den yttre eller inre delen av dammkonstruktionen t.ex. gjutas in i betongplintar i tåtkärnans krön (Ekström & Lier, 2013), se Figur 3-2. Det är också möjligt att installera fixpunkter i inspektionstunnlar och liknande utrymmen inuti dammar. Dessutom behövs referenspunkter på stadig mark utanför konstruktionen, för att bestämma absoluta rörelser.

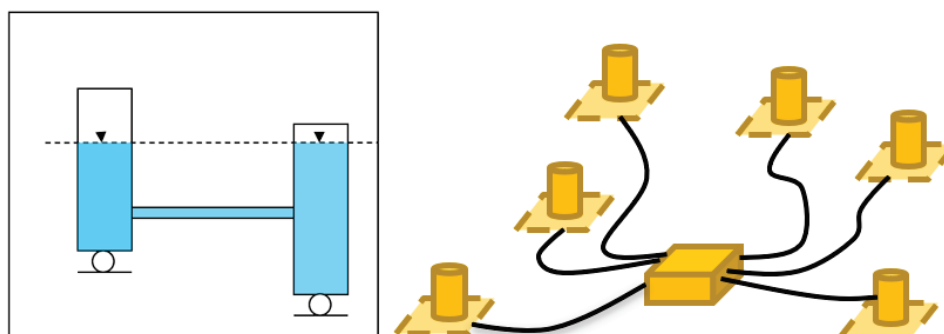


Figur 3- 2 Exempel på dubbar som används inom rörelseövervakning av fyllningsdammar.

För- och nackdelar med avvägning kan sammanfattas enligt följande:

- Låg mätosäkerhet.
- Inget behov av fri sikt mellan intilliggande punkter, vilket gör det möjligt att använda metoden i trånga utrymmen.
- Metoden är ganska tidskrävande och svår att automatisera, vilket gör att den inte kan användas med korta observationsintervall.
- Den mätosäkerhet som kan uppnås med avvägning påverkas också av lokala atmosfärförhållanden (refraktion).

Det är också möjligt att bestämma höjdskillnader med hjälp av hydrostatisk nivellering som baseras på principen om kommunicerande kärl, se Figur 3-3. Höjdskillnaden mellan kärnen bestäms genom att ta skillnaden mellan höjder av vätskekolumner i varje kärl. I ett precisionsnivelleringsystem är kärnen eller kammare ihopkopplade genom luftflödesrör för att uppnå samma atmosfärstryck i alla kammare. Det är även viktigt att kompensera för temperaturskillnader mellan kammare eftersom dessa skillnader kan orsaka nivåskillnader mellan kammare, som inte beror på verkliga rörelser.



Figur 3- 3 Till vänster: principen för hydrostatisk nivellering. Till höger: ett exempel på systemets konfiguration där den centrala enheten successivt bestämmer höjdskillnader mellan två kammare (efter Meier et al., 2010).

För- och nackdelar med hydrostatisk nivellering kan sammanfattas enligt följande:

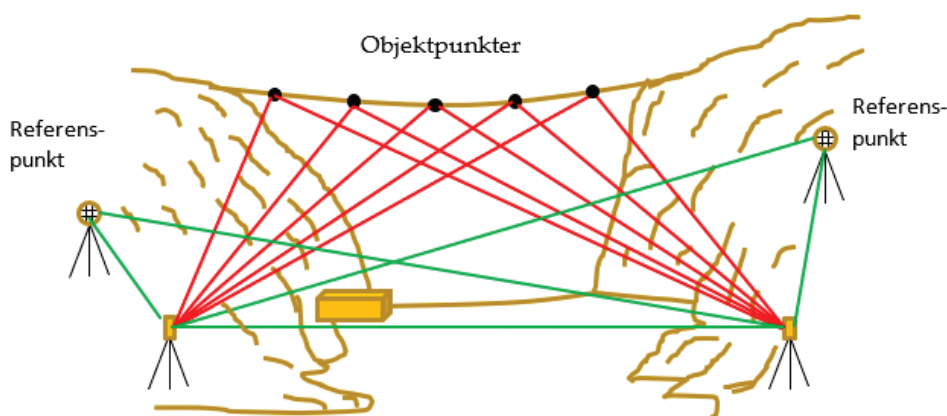
- Moderna system har robust design och kan göra kontinuerliga avläsningar helt automatiskt.
- Mycket låg mätosäkerhet, på 0,01 mm-nivå. Därför används metoden för rörelseövervakning av t.ex. stora forskningsanläggningar (partikelacceleratorer etc.). Det finns också en dokumenterad studie av användning av metoden för deformationsövervakning av en betongdamm i Schweiz.
- Det kan vara en svår och dyr lösning på en damm eftersom det krävs ett nätverk av rör som binder samman observationspunkterna.

3.2.2 Totalstation

Genom att mäta längder och vinklar med totalstation kan koordinater och höjder av kontrollpunkter på dammen bestämmas, se Figur 3-4 och Figur 3-5.

Kontrollpunkterna markeras vanligtvis med prisma installerade på betongpelare på dammens övre del. Självklart behövs det referenspunkter även här och dessa markeras utanför dammkonstruktionen på stadig mark.

Den mätosäkerhet som kan uppnås med mätmetoden påverkas även av lokala atmosfärsförhållanden (refraktion). För att kompensera för refraktionens påverkan kan mätningar mot ett antal kontrollpunkter som är placerade på stadig mark utföras, för att uppdatera den lokala kalibreringsmodellen. Tack vare detta är det möjligt att uppnå mätosäkerhet på millimeternivå inom 1 km räckvidd.



Figur 3- 4 Principen för deformationsövervakning av en damm med totalstation.

Höjdbestämning med totalstation heter trigonometrisk höjdmätning. Där kan mätosäkerhet på ca 4 mm/km uppnås, vilket kan vara lämpligt för fyllningsdammar där förväntade vertikala rörelser kan vara större än på betongdammar. Jämfört med andra metoder för rörelsemätningar som beskrivs i kapitel 3 är övervakning med totalstation den enda metoden som kan bestämma rörelser i både plan och höjd och ger både lägst mätosäkerhet (på millimeternivå), tydlig tolkning av mätresultatet, säkerhet och kostnadseffektivitet (jfr. Frukacz et. al, 2016).



Figur 3- 5 Ett prisma på stativ – en objektpunkt för inmätning med totalstation.

Istället för tidskrävande manuella mätningar med totalstation kan instrumentet installeras på plats (i ett väderskydd) och kontrollpunkterna mäts helt automatiskt. Data kan registreras och överförs automatiskt till en styrenhet. I detta fall fås någorlunda kontinuerlig övervakning (mätningarna kan vid behov upprepas med korta intervall t.ex. två gånger i timmen). Automatiska övervakningssystem beskrivs i avsnitt 3.2.4.

Sedan år 2000 har totalstationer kompletterats med en eller fler kameror inbyggda i kikaren och i dagsläget är det något som är mer eller mindre en standard. Sådana instrument heter Image Assisted Total Stations (IATS). Kameran installeras i totalstationens siktlinje och det som syns i kikaren fotograferas. Tack vare utvecklingen av autofokusering och motorisering av instrumenten finns möjligheter till automatisk inriktning och bildtagning. Detta tar bort behovet av manuell inriktning och därmed en osäkerhetskälla. Genom att använda bildbehandlingsmetoder kan distinkta punkter (naturliga eller markerade) på objektet extraheras och deras rörelse vinkelrätt mot siktlinjen detekteras. Genom att kalibrera kameran och totalstationen samt även mäta avstånd kan 3D-koordinater av observationspunkterna beräknas i ett geodetiskt referenssystem. I flera moderna kommersiella IATS finns även en skanningsfunktion och då heter instrumenten för Image Assisted Scanning Total Station (IASTS). Tack vare att kamerorna tar flera bilder per sekund skapas möjligheter för s.k. dynamisk övervakning där det är intressant att undersöka konstruktionens frekvensrespons till olika belastningar.

Förutom kommersiella IATS och IASTS från de ledande tillverkarna – Leica, Trimble och Topcon – finns det flera experimentella prototyper. I dessa har befintliga kommersiella totalstationer använts och en extern kamera monterats på okularet i kikaren eller okularet bytts ut mot en kamera. Exempel på dessa system är (Zschiesche, 2022):

- DAEDALUS (tekniska universitetet ETH Zurich).
- MoDiTa (i3mainz – Mainz University of Applied Sciences, Tyskland).
- En totalstation från Leica integrerad med en kamera GoPro Hero 5 (University of Zagreb, Kroatien).

Fördelen med IATS är automatisk övervakning utan att behöva vara i kontakt med objektet (speciellt om det är svårtillgängligt) och placera mätmärken där. Å andra sidan fungerar inte metoden på objekt utan några distinkta punkter och då behöver observationspunkterna markeras. Som fallet är med alla optiska metoder är rörelsemätning med IATS beroende av bra ljusförhållanden, vilket också är dess begränsning.

Zschiesche (2022) ger flera exempel på användning av både kommersiella och experimentella IATS för dynamisk övervakning av broar med lovande resultat.

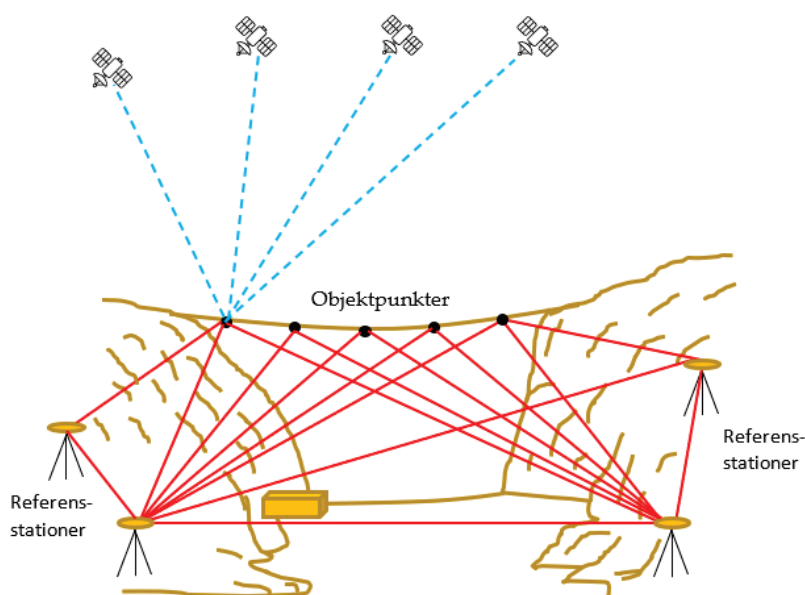
3.2.3 GNSS och pseudoliter

GNSS

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) innefattar framför allt följande satellitsystem: amerikanska GPS, ryska Glonass, europeiska Galileo och kinesiska Beidou. I vardagen brukar tekniken fortfarande kallas för GPS även om de andra satellitsystemen ovan används i stor utsträckning utan att många tänker på det – t.ex. i mobiltelefoner. För att vara korrekt är det därför begreppet GNSS som kommer att användas i rapporten i fortsättningen.

En position på jorden kan bestämmas genom att en GNSS-mottagare bestämmer avstånd till minst fyra satelliter, se Figur 3-6. Mätmetoden baseras på att samma satelliter observeras samtidigt med två eller fler mottagare som ligger relativt nära varandra (inom 10 – 15 km). Minst en av mottagarna fungerar som en referensstation (med känd position). Metoden bygger således på relativa mätningar, vilka gör det möjligt att eliminera flera felkällor och på det sättet uppnå låg mätosäkerhet. Mätosäkerheten beror på observationstid, avståndet till referensstationen och höjdskillnaden i förhållande till referensstationen.

Det finns flera olika metoder för lägesbestämning med GNSS. Den noggrannaste metoden bygger på efterberäkning av statiska mätningar som utförs under längre tid på varje punkt i ett GNSS-nät för övervakningen där GNSS-mottagare med tillhörande antenn placeras stadigt t.ex. på betongpelare. Flera punkter i nätet ska vara kända (s.k. referensstationer). De slutliga koordinaterna beräknas genom en nätutjämnning där det är möjligt att åstadkomma lägesosäkerhet i plan och höjd på under 1 cm-nivå. Genom att använda avancerade matematiska metoder kan mätosäkerheten minskas i plan till millimeternivå. Några studier utförda på dammar i Spanien och Italien kunde påvisa överensstämmelse mellan horisontella rörelser bestämda med statiska GNSS-mätningar och traditionella pendelmätningar (lodning) på millimeternivå (Barzaghi et al., 2016; Cifres et al., 2016).



Figur 3- 6 Principen för rörelseövervakning av en damm med statisk GNSS.

Det är möjligt att bestämma positioner med GNSS i realtid om Real Time Kinematic-approach (RTK) används där positionering sker med en rörlig GNSS-mottagare integrerad med antenn monterad på en mätstång, med hjälp av korrektionsdata från en eller flera referensstationer. Vid användning av en GNSS-mottagare på en närliggande känd punkt som en lokal referensstation, heter metoden enkelstations-RTK. Referensstationen behöver etableras av användaren. Mätosäkerheten ökar med ökat avstånd från referensstationen.

Det är också möjligt att använda sig av ett permanent nätverk av referensstationer för GNSS, som kontinuerligt tar emot signaler från GNSS-satelliterna, där flera närliggande stationer används som referens. Metoden heter då nätverks-RTK (NRTK). Referensstationerna skickar sina data löpande till en driftledningscentral som beräknar och skickar korrektionerna till användarna. Sådan geodetisk infrastruktur, som den brukar kallas, finns idag i flera länder. I Sverige heter den Swepos, inkluderar ca 480 permanenta referensstationer och drivs av Lantmäteriet. Mätosäkerheten hos RTK-metoderna ligger på 1 – 3 cm-nivå. För att använda metoden krävs ett abonnemang hos Lantmäteriet.

Fördelen med NRTK är att metoden inte kräver en egen referensstation och mätosäkerheten inte ökar lika snabbt med ökat avstånd till närmaste referensstation som i fallet med enkelstations-RTK. Å andra sidan, kräver NRTK en fungerande uppkoppling till Internet, vilket kan vara svårt att åstadkomma i glesbygd. Detta problem kan dock lösas med efterberäkning av RTK, vilket fungerar på samma sätt som NRTK dock inte i realtid.

GNSS-tekniken har använts inom deformationsmätningar på dammar och andra anläggningar t.ex. stora broar sedan 1990-talet (Barzaghi et al., 2016), och den har stora fördelar framför andra punktbaseade metoder:

- Möjlighet till kontinuerlig övervakning i 3D (plan och höjd) och automatisk dataöverföring till användare t.ex. via en Internetanslutning. Detta möjliggör detektering av långsiktiga deformationstrender.
- Det behövs ingen fri sikt mellan kontroll- och referenspunkterna, bara fri sikt till satelliter.
- Enkelt underhåll eftersom ingen operatör behöver vara i fält löpande efter att systemet har installerats. Om det inte finns strömförsörjning på plats kan GNSS-mottagarens batteri laddas via t.ex. solceller som monteras runt mottagaren. Därför kan ett val en GNSS-mottagare med låg energiförbrukning övervägas.

Tack vare dess möjlighet att beräkna positioner i realtid kan enkelstations-RTK eller NRTK användas som ett system för tidig varning medan statiska GNSS-nätverk kan användas för långsiktig deformationsövervakning och detektering av mindre deformationer (under 1 cm-nivå). I det enklaste fallet skulle det vara möjligt att installera en GNSS-mottagare i en punkt, upprätta en kommunikationslänk och ta fram en enkel programvara som kan ta emot data, visualisera resultatet av övervakningen samt skicka larm så snart en kritisk förändring inträffar.

Om det inte finns möjlighet att göra beräkningar i egen programvara eller behovet inte finns av ett NRTK-abonnemang finns en lösning som heter Efterberäkning. Detta är en webbtjänst som beräknar GNSS-mätningar relativt Swepos-stationer och tillhandahålls av Lantmäteriet. Beräkningstjänsten kräver också ett abonnemang men det senare är betydligt billigare än det för NRTK. Då är det enda som behövs är att mätningar görs på en punkt med egen GNSS-mottagare under minst 2 tim. Det rekommenderas dock att göra mätningar under 2 – 3 tim för att få ett bra resultat. Sedan skickas mätdata till Beräkningstjänsten och en rapport med koordinaterna och kvalitetsuppgifterna fås strax efteråt. Den mätosäkerhet som kan uppnås är 1 – 2 cm i plan och 2 – 3 cm i höjd på 95 % konfidensnivå.

Diskussionen ovan handlade om relativ positionering med GNSS där det behövs tillgång till en eller flera referensstationer. Tack vare teknikens snabba utveckling är det idag möjligt att bestämma noggranna koordinater med absolut positionering d.v.s. med bara en GNSS-mottagare. Tekniken heter Precise Point Positioning (PPP) och fungerar på ungefär samma sätt som positionering med en smartphone, dock med lägesosäkerhet på centimeternivå. Den noggranna positioneringen är möjlig tack vare noggranna korrektioner för satellitrelaterade fel som skapas och distribueras av en organisation som heter International GNSS Service (IGS) via ett globalt nätverk av permanenta referensstationer för GNSS. Även alla andra felkällor modelleras och korrigeras för i möjligaste mån under databearbetningen.

Det finns både kommersiella mjukvaror och gratis webbtjänster (t.ex. kanadensiska CSRS-PPP och amerikanska APPS) som kan bearbeta data i efterhand. I CSRS-PPP är det t.ex. möjligt att åstadkomma lägesosäkerhet på centimeternivå i plan och höjd efter 1 – 2 timmars observationstid. Metoden är kostnadseffektiv där det inte finns tillgång till ett nationellt nätverk av permanenta referensstationer för GNSS och har fått stor användning inom jordbruket och på maritima oljeplattformar.

Idag är det möjligt att använda positionering med PPP i nära realtid med kommersiella tjänster t.ex. Trimble RTX. Metoden bygger på distribution av korrektioner som distribueras av Trimble (en av de största tillverkare av geodetiska mätinstrument i världen) via geostationära satelliter eller Internet till GNSS-mottagaren. Enligt specifikationerna är det möjligt att uppnå lägesosäkerhet på 2 cm i plan och 5 cm i höjd efter 1 – 20 min. En begränsning till att använda tjänsten i Sverige är att den för närvarande bara är tillgänglig i södra och mellersta delen av landet (ungefär från Gävle och söderut).

Trimble har också utvecklat Trimble Catalyst, en prenumerations-tjänst som möjliggör positionering med lägesosäkerhet på ner till centimeternivå med hjälp av en smartphone-app som är ansluten till en dedikerad GNSS-antenn. Tjänsten har tillgång till Trimble RTX-korrektionsservice och självklart är det möjligt att använda NRTK.

Det pågår ett forskningsprojekt i Australien och Nya Zeeland där det undersöks möjligheter att utföra noggrann positionering (på centimeternivå) med billiga GNSS-mottagare. Första resultat av projektet är mycket lovande och bådadar för att vi inom kort borde kunna använda smartphones för att erhålla positioner med lägesosäkerhet på centimeternivå. En liknande studie har utförts i Tyskland i 2017–2020 där forskarna kunde påvisa att det var möjligt att uppnå mätosäkerhet på 2 –

3 cm-nivå vid statistiska GNSS-mätningar med Android-smartphones (Hesselbarth & Wanninger, 2020).

Pseudoliter

Pseudoliter är markbaserade sändare av GPS-liknande signaler som kan utgöra ett intressant komplement till GNSS där fri sikt till satelliter är begränsad t.ex. i tät bebyggelse eller där GNSS inte alls är tillgänglig t.ex. i en betongdam. Genom att installera 4 eller fler pseudoliter i en lämplig konfiguration kan positionering som är helt oberoende av GNSS åstadkommas. Barnes et al. (2005) använde pseudoliter tillsammans med GPS för deformationsövervakning av en bro med bra resultat.

Under det här projektets gång kunde inte några vetenskapliga studier om pseudoliter utförda under det senaste decenniet hittas. Därför kan det diskuteras om tekniken har blivit mindre intressant, inte minst i samband med kraftfull utbyggnad av GNSS, vilket förbättrar möjligheter för positionering även i t.ex. stadsmiljö.

3.2.4 Automatiserad övervakning med integrerade system

Dammar är väldigt komplexa anläggningar och därför är det inte möjligt att samla in all nödvändig information med en specifik mätmetod t.ex. en geodetisk mätmetod. Därför har den senaste forskningstrenden varit utveckling av integrerade övervakningssystem där flera olika instrument/sensorer samtidigt kan samla in data om objektet på ett kontinuerligt och automatiskt sätt. Kärnan i ett sådant integrerat system är en programvara som sköter kommunikation mellan de ingående instrumenten/sensorerna, databearbetning, analys och även har en larmfunktion om ett kritiskt tillstånd inträffar.

Ett bra exempel på ett integrerat system för deformationsövervakning är tyska systemet GOCA (**GNSS/LPS/LS Online Control and Alarm System**) som har utvecklats vid University of Applied Sciences Karlsruhe sedan 1998 (Jäger et al., 2009). Systemet kan användas för deformationsövervakning i realtid eller för efterbearbetning av deformationsmätningar.

GOCA-systemet illustreras i Figur 3-7 och är uppbyggt enligt följande:

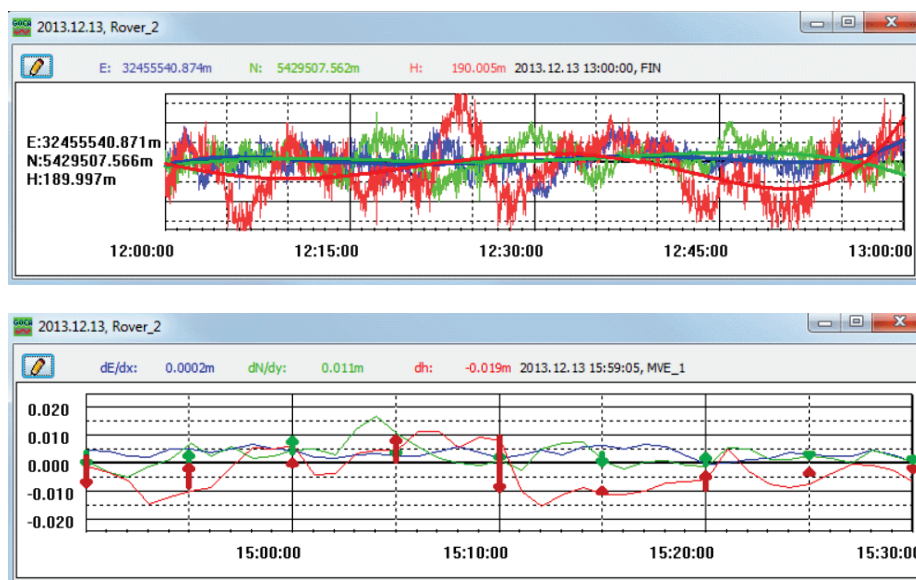
- En uppsättning mätinstrument/sensorer i övervakningsområdet t.ex. GNSS-mottagare, totalstationer och geotekniska sensorer.
- GOCA-programvaran för databearbetning och deformationsanalys.
- En programvara för kommunikation mellan mätinstrumenten och GOCA-programvaran samt för hårdvarukontroll av de olika mätinstrumenten/sensorerna.



Figur 3- 7 Till vänster: principen för deformationsövervakning med GOCA. TPS står för "total station positioning system". Till höger: ett exempel på systemetableringen på en damm. Källa: <http://goca.info>.

GOCA-systemet har använts i flera olika projekt bl.a. för övervakning av en damm i Österrike i 2001, se mer under *Avsnitt 4*.

Övervakningsprocessen kan kortfattat beskrivas enligt följande. Data samlas in kontinuerligt och skickas till GOCA-programvaran som bearbetar dem, beräknar koordinater av objektpunkterna för olika mätepoker och utför deformationsanalys. Hur "täta" mätepokerna kan vara beror på datasamlingsintervall hos de olika sensorerna/instrumenten. Baserat på resultat av deformationsanalysen beräknas och visualiseras sannolikheten för ett kritiskt tillstånd på objektet. Om ett kritiskt tillstånd inträffar skickar systemet ut ett larm till de ansvariga via sms, e-post eller siren. Programmet innehåller ett gränssnitt för överskådlig visualisering av koordinater av objektpunkterna och deformationsförloppet, se Figur 3-8 och 3-9.



Figur 3- 8 Exempel på resultatet av deformationsövervakning med GOCA. Övre bild: rådata med anpassade trendkurvor i en objektpunkt. Nedre bild: uppskattade deformationer i samma punkt. Observera att det är mätningar från olika tidsintervall som visas i övre och nedre bilden. Mätningarna visar hur objektpunkterna rör sig kontinuerligt. Källa: <http://goca.info>.



Figur 3- 9 Exempel på resultatet av deformationsövervakning med GOCA. Från topp till botten: beräknad rörelse, hastighet och acceleration i en objekt punkt. Källa: <http://goca.info>.

Det finns även kommersiella lösningar som stödjer integrerad deformationsövervakning t.ex. Leica GeoMoS (Geodetic Monitoring System). Systemet fungerar på ett liknande sätt som GOCA och bygger på en programvara som kan analysera och visualisera data från olika mätinstrument/sensorer i realtid i en webbapplikation samt skicka ut ett larm. En begränsande faktor till användning av systemet är dess höga kostnad.

Integrerad deformationsövervakning innefattar även en kombination av data från olika typer av mätmetoder d.v.s. punkt- och ytbaserade, för att bättre förstå deformationstrender genom att korsvalidera olika typer av mätningar. Nedan följer en beskrivning av de ytbaserade metoderna. Det är också viktigt att komplettera markbaserade rörelsemätningar på dammar med observationer i borrhålen för att undersöka det geotekniska tillståndet under marken. Detta är speciellt viktigt för jordfyllningsdammar för att övervaka en rasrisk på slänterna.

3.3 YTBASERADE METODER FÖR RÖRELSEMÄTNING

Till skillnad från punktbaserade metoder mäts objektets yta (helt eller delvis) – automatiskt och med hög hastighet – när ytbaserade metoder används. I detta fall görs mätningar inte till specifika punktmarkeringar (t.ex. dubbar eller prismor) utan direkt till objektets yta, s.k. reflektorlösa mätningar. Därför påverkas mätresultatet av ytans material och tillstånd (t.ex. fuktighet) samt infallsvinkeln.

Resultatet av användning av en ytbaserad metod blir ofta ett punktmoln d.v.s. en stor uppsättning koordinatsatta och tät placerade punkter.

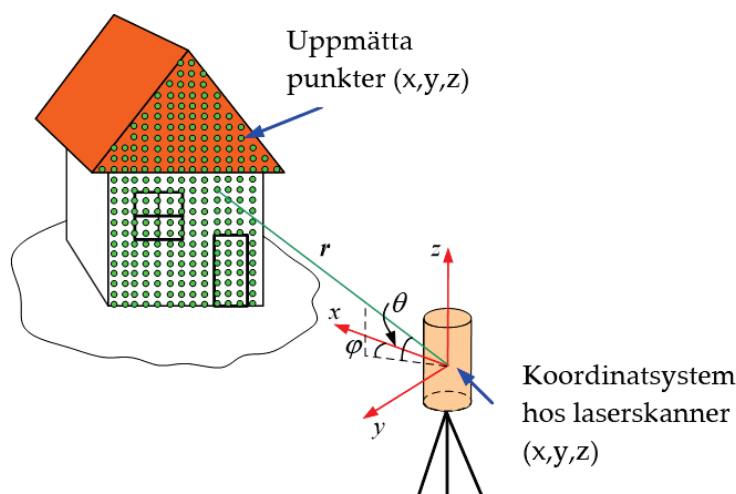
Tack vare att hela ytan täcks finns det möjlighet att upptäcka lokala deformationer. Däremot är det inte möjligt att mäta på en och samma punkt (om den senare inte är en signalerad/markerad eller en distinkt punkt) vid flera tillfällen och mätosäkerheten i varje punkt blir större än i fallet med punktbaserade metoder. Dock kan mätosäkerheten minskas genom att modellera ytan baserat på punktmolnet och jämföra modellerade ytor från olika mätningstillfällen för att få en överblick av deformationer.

De ytbaserade metoder som behandlas i denna rapport är de som följer:

- Markbaserad (Terrester) laserskanning.
- Unmanned Aircraft System (UAS) -fotogrammetri och -laserskanning.
- Satellitbaserad (Interferometric) Synthetic Aperture Radar (InSAR).
- Markbaserad Synthetic Aperture Radar (Markbaserad SAR).

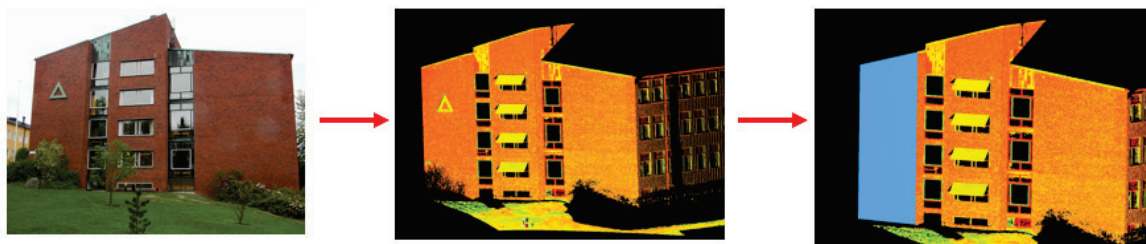
3.3.1 Markbaserad laserskanning

Mätningprincipen för markbaserad laserskanning liknar mätningprincipen för totalstation. Genom att skanna en laserstråle i horisontal- och vertikalled med en dedikerad spegel kan instrumentet, en laserskanner, uppställt på ett stativ, mäta avstånd och vinklar till flera hundra tusen punkter på objektets yta i sekunden, se Figur 3-10. De flesta laserskannrar på marknaden kan även registrera intensiteten (styrkan av den returnerade lasersignalen), vilken kan ge värdefull information om materialet hos objektets yta. Eftersom laserstrålen reflekteras direkt från ytan påverkas mätosäkerheten av hur bra ytan reflekterar laserljuset med viss våglängd. Från vissa objekt (t.ex. med svarta blanka ytor) kan inte några retur (punkter) fås alls, vilket betyder att det blir "hål" i punktmolnet på respektive ställen.



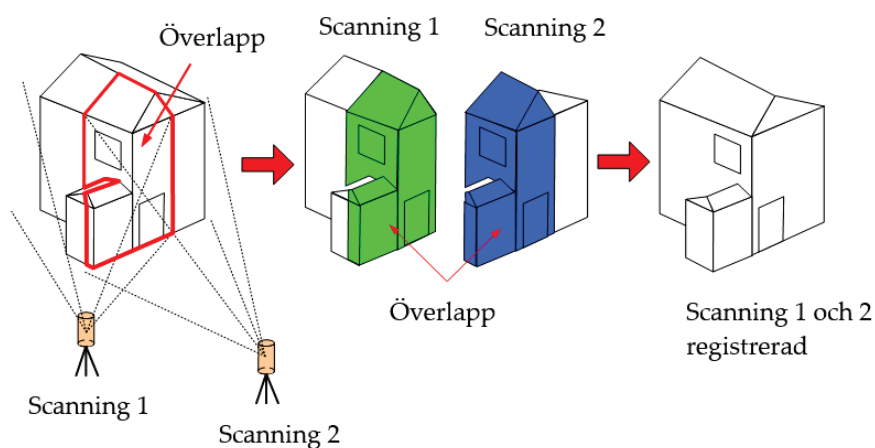
Figur 3- 10 Principen för markbaserad laserskanning.

De mätta avstånden och vinklarna räknas sedan om till 3D-koordinater på objektets yta i ett lokalt koordinatsystem. Resultatet blir ett punktmoln som avbildar ytan i 3D med väldigt hög detaljeringsgrad (med punkttäthet på millimeternivå). Ofta blir slutprodukten av en laserskanning en 3D-modell där olika delar av objektet representeras med t.ex. enklare geometriska former, se Figur 3-11.



Figur 3- 11 Modellerung av ett punktmoln från markbaserad laserskanning.

För att täcka ett objekt görs skanningar från flera olika positioner och det ska finnas en övertäckning mellan respektive punktmolnen. Övertäckningen behövs för att kunna slå ihop flera punktmoln till ett som representerar det skannade objektet. I markbaserad laserskanning kallas denna process för *registrering*. För att få punktmolnet "på rätt plats i världen" (d.v.s. i ett externt referenssystem) behöver *georeferering* utföras genom att passa in punktmolnet på kända punkter som är väl spridda över det skannade objektet. Vanligtvis slås alla skanningar ihop till ett punktmoln först, för att få bra intern geometri, och sedan georefereras punktmolnet, istället för att georeferera varje skanning separat, vilket kan försämra den interna geometrin.



Figur 3- 12 Principen för registrering av två punktmoln från markbaserad laserskanning.

I och med den "två-steps-process" som beskrivs ovan brukar det vara skillnad mellan lokal (inom objektet) och absolut (objektets position i förhållande till andra objekt) lägesosäkerhet i markbaserad laserskanning. Ofta ställs strängare krav på den lokala lägesosäkerheten eftersom det är viktigt att alla delar av t.ex. en byggnad eller anläggning stämmer överens med varandra i punktmolnet. Den lokala lägesosäkerheten beror, förutom reflektansen hos objektets yta och yttre påverkan, dels på skannerns mätosäkerhet, dels på hur bra de olika skanningarna

har registrerats. Den absoluta lägesosäkerheten beror på lägesosäkerheten i de kända punkterna som kan vara inmätta med t.ex. totalstation eller GNSS.

Mätosäkerheten hos moderna markbaserade laserskannrar ligger på millimeternivå. Lägesosäkerheten i laserskanning under ideala förhållanden (väldefinierade objekt) är vanligtvis mindre än (Lantmäteriet, 2021):

- 5 mm i plan och höjd – den lokala lägesosäkerheten.
- 20 mm i plan och höjd – den absoluta lägesosäkerheten.

Eftersom laserstrålen reflekteras från objektets yta fås returerna från den yta som ligger närmast skannern i skanningsriktningen. Detta gör att vid inmätning av t.ex. vegetationsbeklädda ytor kan instrumentet inte se det som ligger bakom vegetationen. Det finns skannerfabrikat som gör det möjligt att registrera flera returerna per utskickad laserpuls, och därför kan laserstrålen penetrera vegetation om den senare inte är för tät. Om det däremot är tät låg vegetation kan inte heller dessa instrument "se" bakom vegetationen.

Användning av markbaserad laserskanning inom deformationsövervakning började undersökas redan i början av 2000-talet, och därefter utfördes flera olika studier på bl.a. dammar. En utmaning i deformationsövervakning med laserskanning är att identifiera punkter som tillhör ett och samma objekt från flera mätepoker. Ett sätt att lösa detta problem är att skapa en 3D-modell utifrån punktmolnet och använda den modellen för deformationsanalys. I det enklaste fallet kan en triangulerad modell (s.k. "mesh") skapas. Det är också möjligt att använda parametriska ytor (d.v.s. ytor som kan beskrivas med en ekvation) som beror på objektets form. I detta fall jämförs ytparametrarna från de olika epokerna och statistiska tester utförs för att avgöra om det har skett deformationer. Istället för att modellera hela ytan kan punktmolnet segmenteras i flera delar och enklare ytmodeller för varje del kan skapas.

3.3.2 UAS-fotogrammetri och -laserskanning

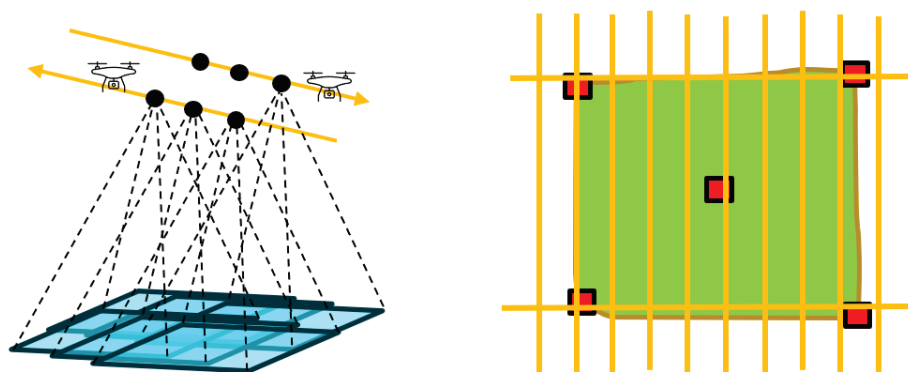
Drönare, eller obemannade luftfartyg, har under det senaste decenniet gjort intåg till geodetisk mätningsteknik. Det är viktigt att poängtera att den metod som används för att göra mätningar och ta fram kravställda produkter (t.ex. digitala terrängmodeller) heter egentligen UAS, eller Unmanned Aerial Systems (obemannade flygfarkostsystem). I ett UAS ingår, förutom själva drönaren (farkosten) även sensor (en digitalkamera eller laserskanner) samt styrnings- och kommunikationssystem. Det är just sensorn som är kärnan i ett UAS eftersom det är den som samlar in de data som sedan bearbetas till en färdig produkt. Drönaren är bäraren för sensorn och underlättar datainsamlingen tack vare möjligheten att täcka medelstora ytor:

- På betydligt kortare tid än vad hade behövts med markbaserade mätmetoder.
- Betydligt billigare än hade varit fallet om bemannade flygfarkoster hade använts.

De typer av drönare som används inom geodetiska mätningar är flygplan och s.k. multikoptrar (d.v.s. med flera rotorerna). Båda typer har sina för- och nackdelar. Flygplan är enklare att underhålla, de kan utveckla höga hastigheter och har längre flygtid, vilket gör att det kan täcka större områden än multikoptrar. Å andra sidan behöver de en längre start- och landningssträcka, kan inte flyga långsamt eller stanna i luften vid fotograferingen och är därför svåra att använda i områden med många hinder t.ex. urbana miljöer.

Multikoptrar har per definition vertikal start och landning och är därför mer flexibla i bruk. De kan flyga med varierande hastighet (och till och med stanna i luften för fotograferingen), är enkla att manövrera och kameravinkeln kan ändras så att kameran även kan ta snedbilder. Dessa egenskaper gör dem till ett utmärkt val för inspektioner och övervakningar. Det är till och med möjligt att samla in data genom att flyga vertikalt längs t.ex. fasader eller dammar och på så sätt dokumentera vertikala ytor. Å andra sidan har de inte lika lång flygtid och hög hastighet som flygplan och kräver mer underhåll p.g.a. roterande delar.

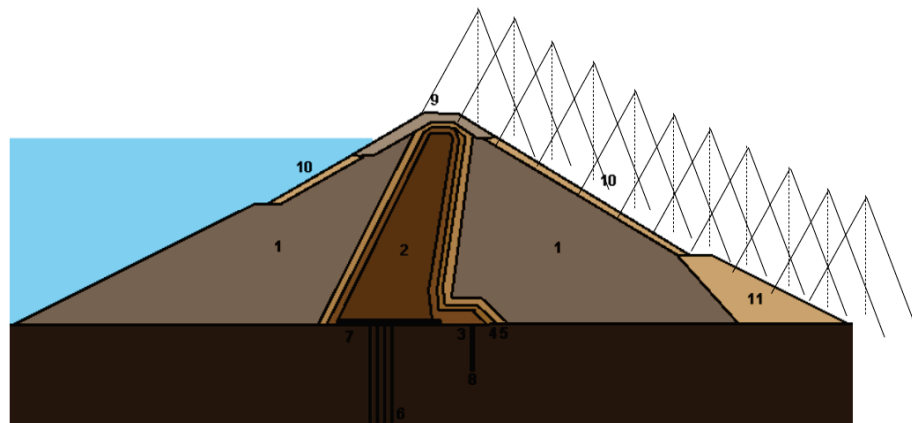
UAS/drönarmätningar med kamera som sensor baseras på fotogrammetriska metoder som med flera förbättringar har använts i mer än 100 år. Enkelt förklarar flyger drönaren, på en viss flyghöjd (max 120 m i EU), i stråk över det utsedda området och tar övertäckande bilder så att hela området täcks, se Figur 3-13. Övertäckning mellan bilderna behövs för att kunna orientera dem relativt varandra genom s.k. digital bildmatchning där en dedikerad programvara beräknar 3D-koordinater för ett antal gemensamma punkter mellan de övertäckande bilderna. Övertäckningen behöver vara minst 75 % i stråklängd och 60 % mellan stråken för att få en produkt med godtagbar kvalitet.



Figur 3- 13 Till vänster: principen för datainsamling med UAS. Till höger: flygrutten uppdelad i flera stråk över ett område (markerad i grönt). Röda kvadrater är kända punkter på marken (flygstöd) som används för georeferering.

En UAS-inmätning börjar med att operatören/fjärrpiloten planerar flygningen över ett specifikt område i en dedikerad programvara. Utfallet av denna planering blir en flygrutt, se Figur 3-13, bestående av flera stråk som farkosten ska följa för att täcka hela området och få bilder med viss markupplösning (pixelstorleken på marken). Flygrutten överförs sedan till autopiloten som är utrustad med en GNSS-mottagare och ett tröghetsnavigeringssystem (Inertial Navigation System, INS) för stabilisering och navigering. Flygningen utförs helt automatiskt längs den förprogrammerade rutten men fjärrpiloten ska hela tiden övervaka flygningen och

ingripa om något inte går som det ska. Ett tänkt förfarande för en UAS-mätning av en fyllningsdamm med fotogrammetriska metoder visas i Figur 3-14.



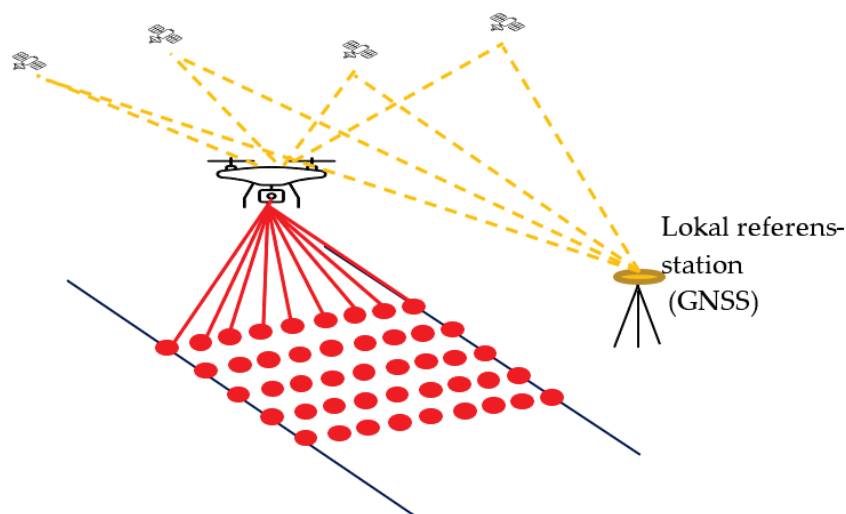
Bildkälla: <https://vattenkraft.info>

Figur 3- 14 Ett tänkt förfarande för en UAS-mätning av en fyllningsdamm med fotogrammetriska metoder

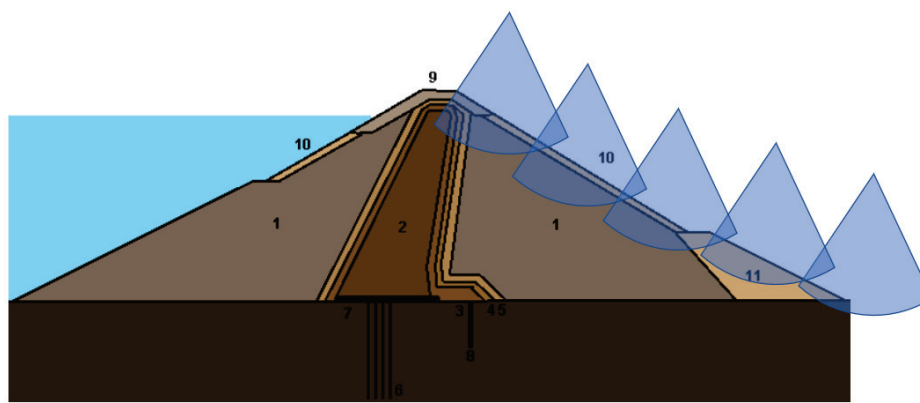
För att kunna georeferera det punktmoln som skapas utifrån flygbilderna behövs det mätas in ett antal stödpunkter (flygstöd) på marken, med totalstation eller GNSS. Stödpunkterna kan vara signalerade (för enklare identifiering) eller naturliga och ska vara jämnt spridda över hela området. Idag är det möjligt att använda RTK- eller PPK (post-processed kinematic) lösningar i datainsamling med UAS/drönare, vilket betyder att punktmolnet kan georefereras med data från drönarens GNSS. Detta kan ske antingen i realtid med RTK eller vid efterbearbetning (PPK). Därigenom kan position för varje bild bestämmas separat, vilket ger, så att säga, "stödpunkter i luften" istället för på marken. Detta förfarande minskar men eliminerar inte behovet av flygstöd. Ett litet antal flygstöd ska alltid finnas för att säkerställa datakvalitet och förebygga förekomsten av grova fel.

Efter att hela bildblocket har georefererats är det möjligt, genom s.k. tät bildmatchning av alla bilder, att få ett punktmoln d.v.s. en högdetaljerad 3D-bild av hela området – alltså samma produkt som laserskanning men med annan metod. För att bildmatchningen ska fungera bra ska bilderna ha detaljrika ytor. Nästa steg i databearbetningen kan vara att skapa en digital terrängmodell av det inmätta området.

UAS-mätningar med en laserskanner baseras på en princip som liknar markbaserad laserskanning, dock görs skanningen i profiler tvärs flygriktningen, se Figur 3-15. Genom farkostens rörelse kan hela området täckas. Det bör nämnas att laserskannrar som används i UAS har ett brett siktfält, upp till 360°, och kan därför även skanna vertikala ytor. De senare kan vara en utmaning för UAS-fotogrammetri när lodbilder tas (dock finns det möjlighet att ta snedbilder med multikoptrar). Skanningen utförs i stråk som ska överlappa varandra för att täcka hela området utan glapp och utföra kvalitetskontroll. Ett tänkt förfarande för en UAS-mätning av en fyllningsdamm med laserskanning visas i Figur 3-16.



Figur 3- 15 Principen för UAS-laserskanning



Bildkälla: <https://vattenkraft.info>

Figur 3- 16 Ett tänkt förfarande för en UAS-mätning av en fyllningsdamm med laserskanner.

För att kunna georeferera varje profil och få ett heltäckande punktmoln måste drönarens bana (*trajectory*) bestämmas med hjälp av ett integrerat GNSS/INS-system ombord farkosten under flygningen. Under efterbearbetningen kombineras positioneringsdata och laserskannerns mätningar för att beräkna ett punktmoln. För att möjliggöra noggrann georeferering behöver användaren etablera en lokal referensstation i området. Även vid laserskanning behöver markstöd, i form av naturliga eller signalerade objekt jämnt fördelade över området, placeras ut. Detta för att kunna detektera eventuellt grova och systematiska fel i data samt som underlag för eventuella transformationer till ett givet koordinatsystem (Lantmäteriet, 2017).

UAS-fotogrammetri och -laserskanning har både för- och nackdelar vilket redovisas i Tabell 3-1 nedan.

Tabell 3-1. Övergripande för- och nackdelar för mätning med UAS-fotogrammetri jämfört med UAS-laserskanning.

Fördelar	Nackdelar
<p>UAS-fotogrammetri är en billigare datainsamlingsmetod än UAS-laserskanning.</p> <p>Det är enklare att underhålla ett UAS-system med kamera än ett UAS-laserskanningssystem.</p> <p>Rent teoretiskt behövs inga data från externa positioneringssensorer (GNSS/INS) ombord farkosten (förutsatt att det finns inmätta referenspunkter på marken/objektet).</p>	<p>Det tar längre tid att ta fram punktmoln från stora bildblock från UAS-fotogrammetri än från laserskanning.</p> <p>UAS-fotogrammetri är till skillnad från laserskanning beroende av bra ljusförhållanden och skuggor kan leda till felaktigheter i punktmolnet.</p> <p>Mätningar med UAS-fotogrammetri kan ej genomföras i mörker till skillnad från laserskanning.</p> <p>UAS-fotogrammetri är svårt att använda i vegetationstäta områden eftersom en kamera inte kan se igenom vegetation. Laserskanning är bättre vid mätningar i vegetation.</p> <p>Ett "vågigt" utseende kan uppstå i punktmolnet vid mätningar med UAS-fotogrammetri av plana hårdgjorda ytor som betong pga svårigheter vid bildmatchning för detaljfattiga ytor.</p>

Mätosäkerheten hos UAS beror på många faktorer som är olika beroende på vilken sensor som används – en kamera eller en laserskanner. Om en kamera används beror lägesosäkerheten i den färdiga produkten – punktmolnet – på:

- Flyghöjd.
- Kameraparametrar.
- Bildkvalitet.
- Övertäckning mellan bilderna.
- Väderlek.
- Markslagstyp.
- Matchningsalgoritmer.
- Placering av flygstöd och deras lägesosäkerhet (vilket beror på metoden för dess inmätning).

Det är svårt att ge någon form av "generell" förväntad mätosäkerhet för datainsamling med UAS/drönare. Tidigare studier har påvisat att det är möjligt att uppnå mätosäkerhet på ner till 2 – 6 cm i höjd utan RTK eller PPK, vilket kan kräva tät placering av flygstöd på marken. Med PPK eller RTK kan lägesosäkerhet på ner till 4 – 8 cm i höjd (på 95 % konfidensnivå) uppnås. För att kontrollera datakvalitet behövs minst 1 stödpoint placerad i mitten av området. Bäst resultat med UAS-fotogrammetri fås på öppna plana hårdgjorda och detaljrika ytor som fotograferas från låg flyghöjd (30 – 50 m) under mulet väder.

De faktorer som påverkar mätosäkerhet hos laserskanning från UAS är bland annat:

- Mätosäkerhet hos det integrerade GNSS/INS-systemet som används för positioneringen.
- Systemkalibrering d.v.s. relativa positioner och orienteringar mellan laserskannern, GNSS och INS.
- Laserskannerns mätosäkerhet (avstånd och vinklar).
- Markytans/objektets beskaffenhet t.ex. material, fuktighet och förekomst av vegetation.
- Flyghöjd och punkttäthet.

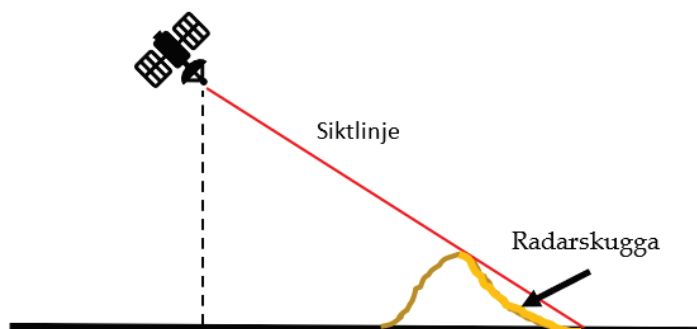
Enligt en studie (Arvidsson & Loveere Pettersson, 2020) som utfördes på Högskolan i Gävle var det möjligt att uppnå mätosäkerhet i höjd på ca 5 cm (på 95 % konfidensnivå) vid laserskanning från UAS från 50 m flyghöjd.

3.3.3 Satellitbaserad (Interferometric) Synthetic Aperture Radar (InSAR)

InSAR-tekniken och dess för- och nackdelar finns väl beskrivna i två tidigare rapporter från Energiforsk/Elforsk (Ekström & Lier, 2013; Lier, 2015) och läsaren hänvisas till dessa publikationer för mera detaljer. Här ges därför bara en kortfattad beskrivning. Tekniken baseras på detektering av relativa rörelser av markytan med hjälp av data från radarsatelliter som kretsar runt jorden och passerar över ett och samma område med jämna mellanrum (från 6 dagar till ca 1 månad). Genom en avancerad bearbetning av en serie av mätningar (radarbilder) insamlade över en och samma plats kan relativa rörelser på millimeter- till centimeternivå beräknas. Det är viktigt att betona mätmetodens relativa natur; absoluta positioner på jordytan har betydligt större lägesosäkerhet.

InSAR fungerar enligt en liknande princip som markbaserad och UAS-laserskanning och har därför liknande begränsningar. Den kan inte bestämma rörelser i områden med vegetation och vid snötäcke; det senare är en utmaning att använda tekniken i norra Sverige. Metoden fungerar bäst på hårdgjorda ytor och i urbana miljöer tack vare bra reflektionssegenskaper hos dessa ytor. Till skillnad från laserskanning kan InSAR "se" genom moln och därför tillhandahålla data fortlöpande, förutsatt att ytans beskaffenhet tillåter att få tillförlitliga retur.

Radarsatelliter kretsar runt jorden ungefär i nord-sydlig riktning och skannar jordytan från sidan, vilket ger upphov till något som heter radarskuggor, se Figur 3-17, varför tekniken fungerar dåligt på t.ex. branta slänter som vetter från satelliten. Detta gör också att med InSAR kan i bästa fall rörelser i höjd och öst-västlig riktning bestämmas medan rörelser i nord-sydlig riktning är svåra att bestämma. Anledningen är att radarsatelliter är känsliga mot rörelser i siktlinjens riktning och mindre känsliga mot rörelser som är vinkelräta mot siktlinjen. Därför spelar objektets orientering roll för att kunna detektera rörelser med InSAR.



Figur 3- 17 Illustration av begreppet radarskugga.

Eftersom InSAR är en satellitbaserad metod producerar den många punkter över väldigt stora ytor. I satellitdata som är fritt tillgängliga via European Space Agency (ESA) har registrerade punkter på jordytan relativt låg täthet (upp till tiotal meter), vilket gör lokalisering av en punkt i plan väldigt osäker. Vid användning av InSAR är det därför inte individuella punkter som bör analyseras utan generella förändringar över större områden. Därigenom kan användaren se på vilka ställen det är viktigt att utföra ytterligare undersökningar av markens stabilitet. Samtidigt finns det kommersiella satelliter som kan leverera mer högupplösta data (t.ex. 1 m markupplösning för tyska TerraSAR-X) med då mot en kostnad. När det gäller dammar så täcker InSAR-observationer en betydligt större yta än själva dammen, vilket med fördel kan användas för detektera sättningar i närområdet, eftersom dessa sättningar kan påverka stabiliteten hos själva dammen i fråga.

Ändå går det att mäta specifika punkter genom att etablera specialtillverkade vinkelreflektorer, se Figur 3-18, som ger en betydligt starkare retur än naturliga eller anlagda ytor. Genom att bestämma reflektorns position med GNSS fås alltså en väldefinierad kontrollpunkt, ungefär på samma sätt som en avvägningsdubb, med det undantag att användaren inte behöver mäta den punkten återkommande utan det är något som fås från satellitdata. Som har påvisats i Lier et.al. (2015) har InSAR-mätningar mot en reflektor väldigt bra överensstämmelse (på millimeternivå) med kontinuerliga GNSS-mätningar på samma punkt.



Figur 3- 18 En vinkelreflektor för InSAR installerad i Mårtsbo, Gävleborgs län. Fotograf: F. Nilfouroushan, Högskolan i Gävle.

Det som är viktigt att komma ihåg vid användning av reflektorer är att det inte är möjligt att få resultat i form av eventuella sättningar direkt efter installationen. Detta eftersom beräkning av tillförlitliga sättningsvärden kräver bearbetning av upp till mer än 40 "radarbilder" som samlas in respektive område med jämna intervall.

En stor fördel med InSAR är tillgängligheten av historiska data d.v.s. "radarbilder", flera år bakåt i tiden, över stora områden. Detta ger möjlighet, liksom i fallet med GNSS, att studera långsiktiga deformationstrender, vilket inte är möjligt med manuella geodetiska metoder som vanligtvis utförs med låg frekvens. I en större kontext ger detta möjlighet att utföra olika typer av analyser inom samhällsplaneringen.

Lier et al. (2015) har slagit fast att InSAR är en tillförlitlig metod för övervakning av fyllningsdammar som väsentligt kan förbättra möjligheter för noggrann rörelseövervakning och minska behovet av mätningstekniska arbeten i fält. Samtidigt kan InSAR inte helt ersätta markbaserade geodetiska mätmetoder, utan de senare bör användas för att validera och komplettera resultatet av rörelseövervakning med InSAR.

3.3.4 Markbaserad SAR

Markbaserad SAR fungerar på ungefär samma sätt som InSAR men den radarutrustning som skickar ut och tar emot mikrovågor står på marken och flyttas på en skena, se Figur 3-19. Tekniken kan installeras permanent och samla in data kontinuerligt, med ett visst intervall (t.ex. några minuter). Alternativt kan mätningar göras med återbesök t.ex. en gång i månaden. Metoden presterar bäst i det kontinuerliga läget.



Figur 3- 19 Terrester SAR. Källa: Di Pasquale et al. (2018). <https://doi.org/10.3390/s18010244>. © Författarna. Licensinnehavare: MDPI, Basel, Schweiz. Reproducerat enligt Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Markbaserad SAR har både för- och nackdelar jämfört med annan teknik för ytbaserad rörelseövervakning vilket redovisas i Tabell 3-2 nedan.

Tabell 3-2. Övergripande för- och nackdelar för mätning med markbaserad SAR jämfört med andra metoder för ytbaserad rörelseövervakning.

Fördelar	Nackdelar
<p>Relativt enkel teknik och kan användas av mindre kvalificerad personal i fält</p> <p>Tillförlitliga mätningar på avstånd upp till 1 – 2 km till objektet (enligt Ogundare (2015) – upp till 4 km)</p> <p>Kan göra mätningar dygnet runt, under alla väderförhållanden och utan att behöva vara i närheten till objektet</p> <p>Till skillnad från InSAR kan markbaserad SAR detektera horisontella rörelser hos fyllningsdammar (p.g.a. ändringar av vattennivån) tack vare en annan mätningsriktning (från sidan vs. ovanifrån).</p> <p>Går att uppnå mätosäkerhet på 1 mm-nivå och mindre.</p>	<p>Relativt dyr teknik och utförda mätningar kräver avancerad databearbetning</p> <p>Mäter endast rörelser längs siktlinjen</p> <p>Resultatet beror på reflektans hos objektets yta och förekomst av vegetation (radarvågorna kan inte penetrera vegetation)</p> <p>Resultatet kan påverkas av variationer i luftfuktighet under mätningarna</p> <p>Lägre punkttäthet än markbaserad laserskanning och UAS. Hos markbaserad SAR uppnås en punkttäthet på några punkter per kvadratmeter under gynnsamma förhållanden och korta avstånd</p>

3.4 RÖRELSEMÄTNING I DAMMKROPPEN

3.4.1 Inklinometer

En inklinometer är en typ av mätmetod för att mäta horisontella rörelser i en dammkropp genom att studera lutningsförändringar. Ett plaströr, inklinometerrör, (vanligen 70 mm i diameter) borrar ned i ett område med en viss svaghet eller där behov av rörelsemätning finns. Röret installeras vertikalt ned till berg, morän eller 3–6 m under det utvalda området och beroende på jordtyp injekteras fast (friktionsjord, fast lera) eller rekonsolideras (lös lerjord) för att på så vis följa jordens rörelser (SGF, 2006). Vanligen placeras inklinometrar i filtret nedströms dammkrön, men mätningar på uppströmssidan är också förekommande. I vissa fall mäts även vid spontände där läckagevatten kan förväntas ledas från betongkonstruktion och ut i fyllnadsdammen.

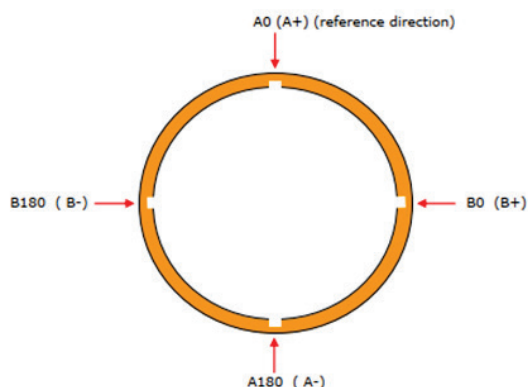
En inklinometer mäter lutningen på röret vid mätpunkter definierade vid varje halvmeter (förekommer även varje meter). Genom att upprepa en ny mätning vid ett senare tillfälle kan rörets lutningsförändring bestämmas. Rörets absoluta position samt relativa förskjutning kan fås genom integrering av lutningsvärdet respektive lutningsändringen för respektive mätpunkt. Mätningen brukar delas upp i två huvudutföranden; manuell respektive automatisk inklinometermätning. Automatiska inklinometermätningar används främst för övervakning och därmed kunna larma för skred eller liknande processer. Manuella mätningar utförs i utvärderingssyfte, för att kunna jämföra rörelser över tid.

Automatisk mätning

För att mäta kontinuerligt installeras ett antal sensorer med jämnt avstånd längs med det aktuella området i inklinometerröret. Val av avstånd samt antal sensorer bedöms utefter omfattning av den horisontella förskjutning som förväntas ske i området. Sensorerna ansluts till en avläsningsenhet som registrerar uppmätta värden. Eftersom automatisk mätning kräver en mängd sensorer, blir totala kostnaden för installationen en multipel av antal sensorer. Automatisk mätning behöver ofta kalibreras var 3:e år.

Manuell mätning

För att utföra en mätning förs en inklinometersond ned i inklinometerröret, vars insida består av vertikala spår, se Figur 3-20. Sonden har två fjädrade hjulpar som placeras i spåren och därmed har en bestämd orientering längs med röret. Riktningen blir således identisk (om röret inte vrids) för varje upprepat mättillfälle, för jämförbara mätningar. Det är av stor vikt att samma mätinstrument används vid upprepad mätning, eftersom varje instrument har en unik kalibrering som kan påverka mätnoggrannheten.



Figur 3- 20 Inklinometerrör med spårriktningar A0, B0, A180 och B180.

Vid mätning registreras lutningen samtidigt i två riktningar, A och B för varje mätpunkt. A-riktningen utgör den förväntade riktning som en deformation förväntas ske i. Vid samma mättillfälle utförs ytterligare en mätning i motsatt A-riktning genom att rotera sonden 180 grader. Detta görs för att säkerställa att erhållet resultat ligger inom mätnoggrannheten. För en tvåaxlig inklinometer sker mätning i A- och B-riktning samtidigt. A-riktningen definieras vinkelrätt mot dammlinjen i riktning nedströms och B-riktningen definieras parallellt med dammlinjen i negativ längdmätning. Vid mättillfället bör röret kontrolleras med avseende på rörlängd och spårriktningar. A-riktningens spår kan avvika ett antal grader vilket bör noteras, eftersom denna avvikelse får stor påverkan på efterföljande analys.

Sonden sänks ned till rörets botten med hjulparet närmast mätriktning riktade nedåt. Mätningarna startar längst ned i botten och varje steg eller segment motsvarar en avläsning, ett segmentavstånd på omkring 0,5 meter beroende på inklinometertyp. Sonden är ansluten till en handdator som registrerar varje avläsning. Vid rörmynningen placeras ett lock med en öppning som omsluter de metallfästen som är fixerade vid varje halvmeter längs med kabeln. Användaren kan därmed enkelt dra upp sonden en halvmeter, utföra en avläsning med ett knapptryck på handdatorn och därefter dra upp ytterligare en halvmeter till dess att sonden når rörets överkant.

Foto från mätning med manuell inklinometerutrustning på en fyllningsdamm redovisas i Figur 3-21.

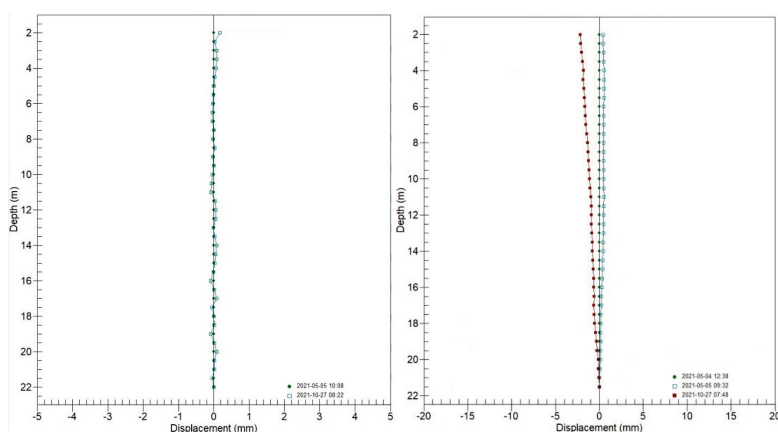


Figur 3- 21 Manuell inklinometerutrustning med sond, avläsningsenhet (handdator) samt lock vid rörmynningen för att fixera varje mätpunkt.

Redovisning av resultat

Vid installation av inklinometer utförs en referensmätning som påföljande mätningar jämförs med. I vissa fall har äldre mätningar jämförts mot föregående avläsning och ej mot sin referensmätning (ursprunglig lodlinje), vilket blir ett missvisande resultat med avseende på deformation relativt ursprungsläget.

Resultatet från en inklinometermätning kan redovisas som *cumulative* (ackumulerad) rörelse från rörets botten och uppåt vilket motsvarar totaldeformationen. Det går även att redovisa *incremental* motsvarande uppmätt rörelse för varje mätnivå, se Figur 3-22.



Figur 3- 22 Uppmätt rörelse för varje mätnivå i relation till referensmätning (t.v.) och uppmätt ackumulerad rörelse från rörets botten för varje mätfälle (t.h.).

De vanligaste inklinometersonderna kan varna för stora temperaturskillnader som kan uppstå om en sond inte hunnit anpassa sig till omgivningstemperaturen. Sondens känslighet och noggrannheten vid varje mätning samt dess orientering påverkar och sätter begränsningen för hur precist utfallet blir. Den uppmätta lutningen fås som funktion av mätpunkternas avstånd och efterföljande mätningssomgångar bör därmed utföras med samma sond för att mätdjupet ska överensstämma och ge motsvarande mätavstånd.

Mätnoggrannheten bestäms på empirisk väg och inkluderar systematiska och slumpmässigt uppkomna fel på grund av konstruktion av inklinometer, rörsensor eller operatör. Mätnoggrannheten bestäms genom interpolering av mätnoggrannheten som anges i produktbladet. Exempelvis ger en mätnoggrannhet på ± 2 mm för ett 25 m långt rör motsvarande 3,5 mm för ett 44 m långt rör. Detta brukar benämnas som totaldeformation (cumulative deformation).

Avläsningsinstrumentets sensor har i storleksordning en mätnoggrannhet på $\pm 0,1$ mm.

Installation

För fasta jordar krävs att inklinometerdröret drivs ned med foderrörsborrning och rören därefter injekteras fast. Dimensionen på foderrören ska väljas med så liten dimension som möjligt för att undvika att rörelser uppkommer. Hålet bör dock vara tillräckligt stort för att kunna injektera med slurry. Generellt brukar ett riktvärde på 50 mm större innerdiameter på foderröret användas, vilket är i samklang med de foderrörssystem som existerar på marknaden (139,7/128,9).

Slurryn eller filtersanden som fylls (boerande på omgivande material) får ej hällas ned för snabbt eller i för stor mängd åt gången. Om stora vertikala sättningar förväntas i utvalt installationsområdet bör trapetsskarvar monteras mellan rörskarvarna för att ta upp vertikala rörelser och undvika att inklinometerröret tar skada. För mer installationsspecifika detaljer hänvisas till Svenska Geotekniska Föreningens metodbeskrivning för installation av inklinometerrör (SGF, 2006).

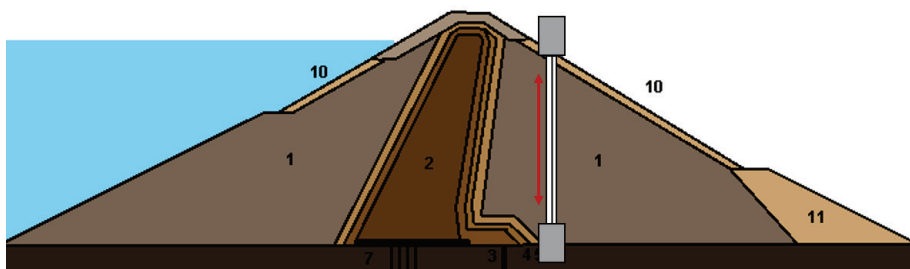
I Tabell 3-3 sammanfattas några övergripande för- och nackdelar för mätning av deformationer med en inklinometersond.

Tabell 3-3. Övergripande för- och nackdelar för mätning med inklinometersond.

Fördelar	Nackdelar
Portabel utrustning Varnar för temperaturskillnader Mätnoggrannhet (mäta rörelser med hög noggrannhet i horisontalled) Scannar av ett större djup relativt enkelt	Går ej att avgöra om inklinometerröret är vridet, eftersom sonden läser styrspårets riktning Förekomst av stora sättningar i konstruktionen (i första hand för att övervaka horisontalrörelser). Röret kan ej komprimeras, böjs ut. Vet ej om det beror på vertikala eller horisontella rörelser. Dyrt med automatiserad inklinometer
När används metoden	Varför används metoden
Horisontella rörelser på djup Automatiserad: Övervaka/larma för hastiga deformationer ex. skred Manuell: Utvärdera deformationer över tid, följa upp beteende	Mäta rörelser i profil genom dammkroppen vid svaga partier eller vid identifierade punkter tex. spontände Förvarning vid känslig punkt som behöver övervakas

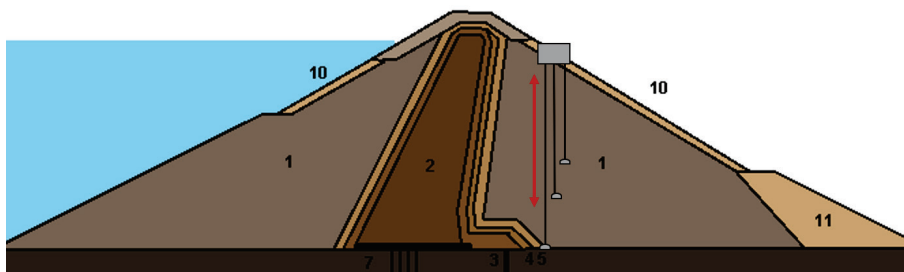
3.4.2 Extensometer

Extensometer installeras i borrhål för att övervaka rörelser mellan två definierade punkter. En extensometer mäter till skillnad från inklinometern rörelseändring i borrhålets axel, medan inklinometern mäter rörelser i det horisontella planet. Extensometern består av en stång/lina i stål eller glasfiber som förbinder en referenspunkt med ett mätankare, se Figur 3-23. Referenspunkten kan exempelvis vara placerad på dammkrönet och mätankaret kan vara förankrat i berggrunden under dammen eller på olika nivåer i dammen. Därefter mäter en givare rörelsen hos stången/linan vilket används för att förstå om avståndet mellan referenspunkten och ankaret ökar eller minskar. Extensometer mäter på så sätt relativa förskjutningar mellan två definierade punkter. Det finns vanligtvis möjlighet att utföra en kontrollmätning av förskjutningen mellan punkterna med skjutmått i extensometers mät huvud.



Figur 3- 23 Enkel principskiss över extensometers funktion, dvs att mäta rörelser mellan två punkter.

För att öka användningsområdet kan flera extensometrar installeras i samma borrhål och fixeras på olika nivåer, se Figur 3-24. På så sätt kan extensometrar används för att lokalisera nivåer för deformationer. Extensometrar bör framförallt användas för speciella situationer där det redan konstaterats att ogynnsamma rörelser förekommer som ett led i den specifika övervakningen av dessa eller som en del i en utredning av åtgärdsbehovet.



Figur 3- 24 Enkel principskiss över extensometermätning på tre olika nivåer för att få en uppfattning på vilken höjd sättning utvecklar sig.

Mätmetoden är pålitligt och robust med valbart mätområde. Extensometrar ersätts dock ofta av inklinometrar eftersom rörelser i horisontalled är vanligare vid fyllningsdammar. Om risken för horisontella förskjutningar i berget under dammen anses vara stor, är extensometer däremot vanligt förekommande. Extensometern kan då även borraras med 45 graders vinkel för att mäta förskjutningar i berget. I Tabell 3-4 sammanfattas några övergripande för- och nackdelar för mätning av rörelser med en extensometer.

Tabell 3-4. Övergripande för- och nackdelar för mätning med extensometer.

Fördelar	Nackdelar
<p>Pålitligt och robust</p> <p>Kan användas i rör med små dimensioner</p> <p>Signalbehandling direkt i mät punkt (2-trådsledare kan användas vilket är prisvärt)</p>	<p>Begränsat användningsområde hos fyllningsdammar. Ersätts ofta av inklinometer.</p>
När används metoden	Varför används metoden
<p>Rörelser i undergrunden</p> <p>Sättningar i dammkropp</p> <p>Övervaka släntstabilitet</p> <p>Punktvis övervakning</p>	<p>För att mäta på vilken höjd sättning utvecklar sig. Placerade på olika nivåer, uppfattning om var i profil sättningar sker.</p> <p>För att detektera rörelser i berget under dammen.</p>

3.4.3 Sättningsmätare

Vertikala sättningsmätare används i fyllningsdammar för att mäta vertikala deformationer. Sättningsmätaren består av en referensgivare i botten på ett mätrör, en sättningsgivare installerad på vald nivå samt en sättningsindikator. Sättningsindikatorn placeras vid rörets överkant och används för att läsa av nivån på ett måttband som sänks ned i mätröret (Geometrik, 2021). Vertikala sättningsmätare används även för att mäta sättningar i jordlager.

En annan typ av sättningsmätare för att mäta tredimensionella deformationer relativt dammkrönet eller undergrunden är inklinometer med monterade plattor. Plattorna monteras på utsidan av ett inklinometerorr med en magnet på insidan som känner av om plattorna rör sig i definierad riktning (uppåt eller nedåt). (ICOLD, 2019)

Det finns även slang-sättningsmätare som känner av tryckhöjd i förhållande till en vätskebehållare och elektriska sättningsmätare som används vid nybyggnationer och placeras på olika nivåer i dammen.

3.4.4 Optisk fiber

En fiberoptisk kabel består av en ljusledande kärna, vilken kan leda en signal en lång väg med låga förluster. Ljussignalen färdas med ljusets hastighet och tillåter därför snabb kommunikation för diverse användningsområden. I svenska dammanläggningar används fiberoptik i fyllningsdammar framför allt för mätning av temperatur för detektering av läckage. Möjligheten finns dock att använda optiska kablar för detektering av rörelser i dammkroppen.

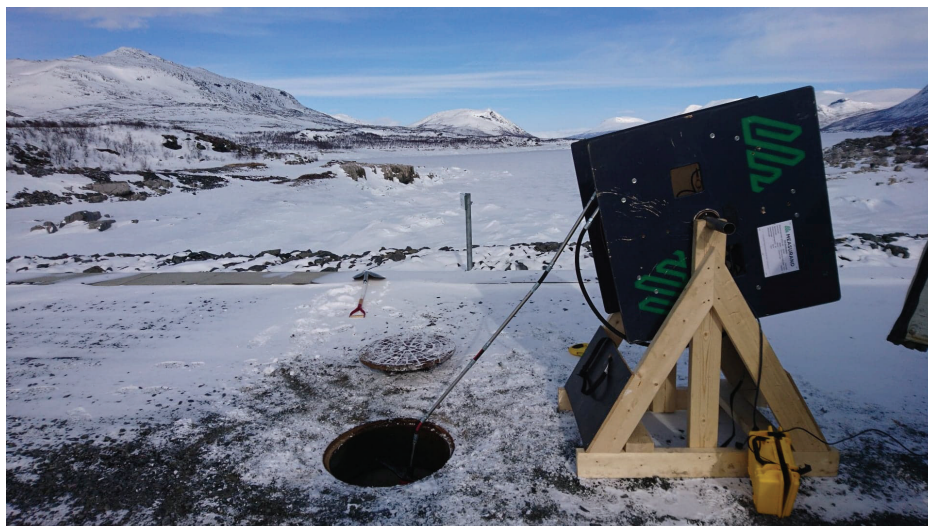
Den stora fördelen med att använda fiberoptik är att töjningen (rörelsen) kan mätas längs hela kabelns längd. Fiberoptiska töjningsmätare har hög precision, Photonics (2015) ger ett exempel på en 10 km lång mätare med mätintervall på 1 m och en upplösning på $\pm 0,010 \mu\text{s}$. Mätintervallet går att göra betydligt mindre för övervakning av mindre strukturer.

3.4.5 ShapeArray (SAA)

ShapeArray (SAA) skiljer sig från tidigare inklinometermodeller med avseende på förmågan att mäta deformationer och sättningar i marken med hög noggrannhet i tre dimensioner. SAA kan mäta horisontella och vertikala inklinationer, lutning gentemot gravitationen och i olika typer av borrhullinstallationer. SAA ger information om både avvikelser i position och lutningsvinkel. Jämfört med tidigare inklinometermodeller har SAA även ett större vinkelomfång i mätningarna. Enheten består av en kabel upplindad på en kabeltrumma med ledade, styva mätsegment som registrerar deformationer på kabeln. Se Figur 3-25 för en storleksuppfattning av utrustningen. Utrustningen kan beställas i önskad längd men maximum 100 meter och segmenten är fördelade på intervall om 302 eller 500 mm. Varje segment är uppbyggt av triaxiala MEMS-accelerometrar, en analog-digital-konverterare, en temperatursensor samt en mikroprocessor. Segmenten är sammanbundna med leder som kan böjas fritt men ej vridas. Kabeln kan användas till både horisontella, vertikala och cirkulära mätningar (samma utrustning kan användas till alla ändamål). För vertikal mätning registreras position i X-, Y- och Z-

led medan för horisontell mätning fås mätningar av sättning i vertikalled, X-Z-planet där Z motsvarar distansen längs med segmenten. SAA-tekniken kan användas i rör av valfritt material med en minsta rekommenderade inre diameter på 27 mm (Measurand, 2022a).

Tack vare att segmenten är ihopsatta är det möjligt att styra vilken del av mätutrustningen som ska vara aktiv. Det är således möjligt att ha tysta segment utan sensorer eller förlängningstuber längs upp vid markytan för extra längd.



Figur 3- 25 SAA-utrustning i fält bestående av kabeltrumma, fältdator och segment placerade i ett mätrör.

SAA mäter lutningen i två ortogonala axlar jämfört med konventionella inklinometrar som är uniaxiala. Mellan varje led mäts vinkelförändringen i två axlar samt accelerationen. I varje segment mäts temperaturen som registreras vid samma tidpunkt som lutningen. Resulterande data ges i XYZ-deformation [mm], vinkelförändringen [°], acceleration [g] samt temperatur [°C]. Kontinuerlig dataöverföring sker till en dator, telefon eller annat typ av hjälpmedel för möjlighet till övervakning och alarmfunktioner. Mätutrustningen kan utökas med porttrycksmätare för att ge heltäckande information om hur vattenståndet är relaterat till deformationen som uppmätts (Geotechnical Observations, 2022).

På varje segment sitter tre MEMS-accelerometrar som används för att registrera lutningen hos respektive segment. Precis som övriga inklinometrar används lutningsvinkeln, θ och segmentlängden, L för att representera avdriften. SAA representerar avdriften som en linje i 3D-rymden. För varje segment fås en ny del av linjen. SAA blir på så vis som en kedja med inklinometrar. Endast vertikal mätning ger en analys i tre dimensioner medan de övriga mätalternativen horisontell och cirkulär mätning ger två dimensioner. Mätdata som registrerats av mikroprocessorn lagras i .rsa-filer innehållandes tre kolumner per segment, där varje kolumn ger lutningen i respektive axel X, Y och Z. SAA kräver en referens för att kunna orientera insamlad data. X-axeln kan kopplas till en specifik X-markering på segmenten eller mot magnetisk nordpol om SAA har utrustats med en magnetometer alternativt en kompass för manuell inmatning (Measurand, 2022a).

Uni- och biaxialt

Den främsta skillnaden mellan uniaxial respektive biaxial mätning är antal riktningar som förskjutningar mäts i. Effekten av att enbart mäta uniaxialt blir att mätningen antas ligga i linje med den maximalt förväntade förskjutningen. Om en sensor är något felriktad till huvudriktningen (vinkelrät gentemot föremålet) kan en extra riktningmätning hjälpa till att korrigera för denna felaktiga riktning. Slutgiltiga riktningen blir resultaten av de två riktningsektorerna, mätningen och den korrigerade mätningen. Om enbart uniaxial sensor eller en biaxial sensor med inaktiv ortogonal riktningmätning används kan detta innebära att felaktiga bedömningar utförs eller att alarm utlöses vid fel tidpunkter.

Genomförande av mätning

Vid mätning med SAA-modellen SAAScan på en anläggning placeras kabeltrumman 1-1,5 meter ifrån borrhålet. Avståndet medför att så lite segmentyta som möjligt belastas utanför borrhålet. Kabeltrumman bör placeras i samma riktning som mätningen ska utföras för att dels underlätta kalibrering med X-axeln, dels för att undvika böjning. Vid kalibrering noteras vilket segmentnummer (antal segment från botten) som är närmast ytan vid borrhålet, vars X-markering är tydligt synlig. I programvaran SAAScan, som används för att utföra en mätning i fält, anges segmentnummer och gradtal från referensriktningen. Riktningen på kabeltrumman kommer därefter att motsvara positiv X-led på insamlat data (Measurand, 2022b).

I Tabell 3-5 sammanfattas några övergripande för- och nackdelar för mätning med mätinstrumentet SAA.

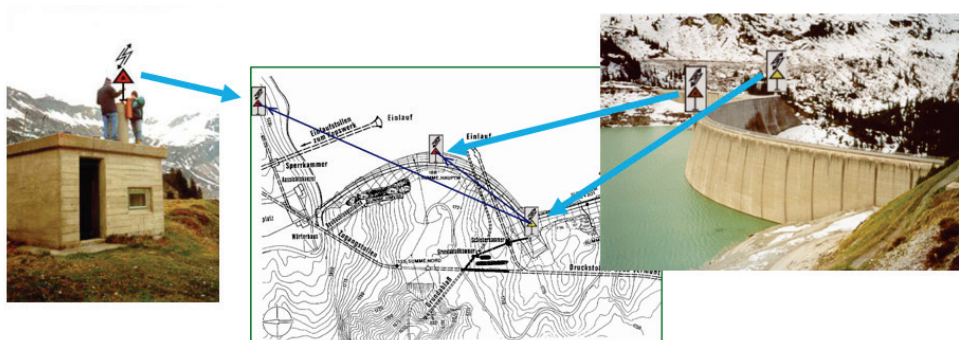
Tabell 3-5. Övergripande för- och nackdelar för mätning med SAA.

Fördelar	Nackdelar
Mätningen går fort, kräver mindre tid jämfört med en inklinometermätning	Ingen tydlig referenspunkt (inga inklinometerspår)
Mäter varje segments position i X, Y och Z-led	Otymlig utrustning, krävs två personer för att hanteras i fält
	Sämre noggrannhet jämfört med inklinometer
När används metoden	Varför används metoden
För mätning av filterspets, identifiera läget i dammen	Kan användas i befintliga rör, kräver inga nyinstallationer likt inklinometer
Kartläggning av befintliga vattenståndsrör	Robust utrustning
Permanent installation för övervakning av deformationer i dammkroppen	Komplement till inklinometermätning

4 Internationell utblick

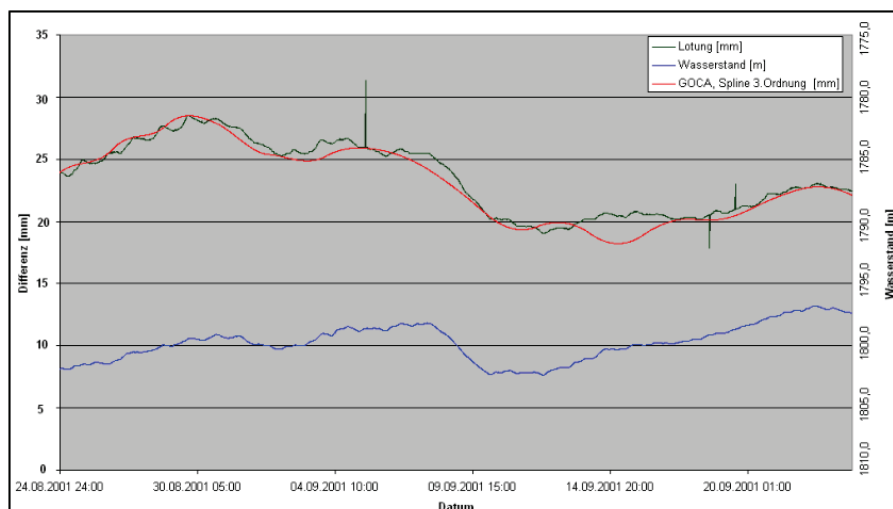
4.1 AUTOMATISERAD ÖVERVAKNING

För att illustrera hur deformationsövervakning med GNSS utförs på ett automatiserat sätt har GOCA-systemet (beskrivet i kapitel 3) valts som exempel. Under studiens gång kunde inga exempel på användning av GOCA-systemet på fyllningsdammar hittas, varför här ges ett exempel på användning av systemet på en betongdamm i Kops i österrikiska Alperna, se Figur 4-1. Systemet var installerat på dammen under ca 1 år. Etableringen bestod av tre GNSS-mottagare varav två placerades på dammen och en på ett stabilt underlag 500 m utanför dammen. Intervall för insamling av GNSS-data var två minuter.



Figur 4- 1 Etablering av GOCA på Kops damm. Källa: Jäger et al. (2009)

Observerade horisontella rörelser (vinkelrätt mot dammen) i punkten på dammens krön (i krönets centrum) visas i Figur 4-2. Den röda linjen visar en trendkurva anpassad till mätningarna, den svarta – mätningar från lodning i samma punkt och den blå – variationer av vattenståndet. Observationstiden i figuren är fyra veckor. Dels kan en väldigt bra överensstämmelse konstateras mellan den traditionella mätmetoden (lodning) och GOCA, dels kan ett samband ses mellan punktens rörelser och variationer av vattenståndet.



Figur 4- 2 Resultat av deformationsmätningar med GOCA på Kops damm. Observera att det är två olika skalor i figuren: till vänster – för rörelser och till höger – för vattenståndet. Källa: Jäger et al. (2009).

Ett bra exempel på ett automatiserat övervakningssystem baserat på totalstationer är övervakningssystemet installerat i nedre delen av glaciären Great Aletsch i de schweiziska Alperna (Frukacz et al., 2016). Syftet med systemet är att studera kort- och långvariga deformationer (på millimeter- till decimeternivå) i dalen vid glaciären. Systemet består av följande delar:

- Ca 30 observationspunkter markerade med prismor och installerade på slänterna samt i jordskredsområden med förväntade rörelser på 10 cm/år.
- Två totalstationer monterade i väderskydd på aluminiumpelare som är förankrade i berget. Instrumenten mäter automatiskt prismorna några gånger per dygn. Maximalt avstånd från instrumenten till observationspunkterna är ca 2 km.
- Fyra GNSS-mottagare/antennor som kontinuerligt samlar in data.
- Meteorologiska sensorer placerade nära totalstationerna.
- En sensor för mätning av temperatur i berget.

Totalstationerna är fjärrstyrda från en server på kontoret via programvaran GeoMoS från Leica (som nämndes i avsnitt 3.2.4) och strömförsörjningen sker via solceller och extra batterier.

Forskargruppen har utfört flera tester för att undersöka påverkan av olika faktorer på mätosäkerheten. De faktorer som har identifierats var oönskade reflektioner från skyddsglasat i väderskyddet, atmosfärsrefraktion, orientering av totalstationen i förhållande till prismorna och pelarens stabilitet. Bland annat har det rekommenderats att inte använda ett skyddsglas i väderskyddet eller borra ett hål i det för att mätningarna inte görs genom glaset. Det har visat sig att påverkan av faktorerna ovan kan vara på samma nivå som de rörelser användaren vill upptäcka. Därför är det viktigt att vara medveten om dessa faktorer och minska deras påverkan för att uppnå tillförlitliga resultat i rörelseövervakningen. Liknande undersökningar utfördes även av Leinhart (2017) som betonar vikten av förståelse för de faktorernas påverkan på resultatet av rörelsemätningen.

4.2 GNSS

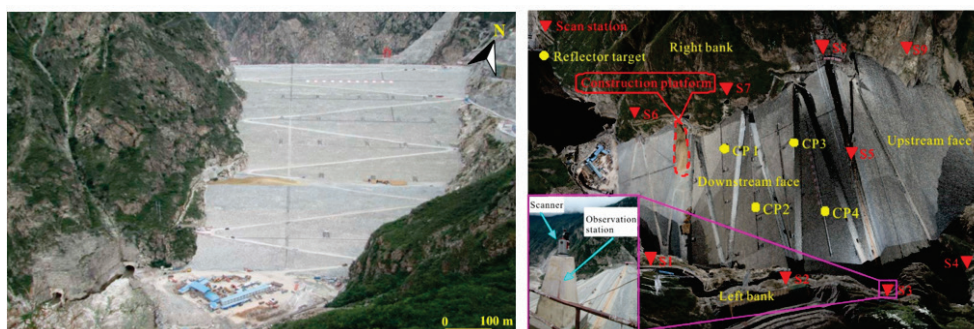
Ett bra exempel på att GNSS PPP (d.v.s. absolut positionering med lägesosäkerhet på centimeternivå) är en tillförlitlig metod för rörelseövervakning är en studie som utfördes i Kina på ett jordskred (Lin et al., 2021). Mätningarna utfördes under juni 2019 – januari 2020. Data bearbetades både som statiska mätningar och med PPP-metoden. Mätosäkerheten som kunde uppnås med de statiska mätningarna var inom 2 mm i plan och 5 mm i höjd. Mätosäkerheten i höjd validerades med avvägning som har påvisat nästan identiska resultat.

När positioner med PPP beräknas tar det viss tid innan mätosäkerheten minskar till centimeternivå och stabiliseras på denna nivå. Denna tid kallas för konvergenstiden. I studien av Lin et al. (2021) var konvergenstiden ca 30 min varefter mätosäkerheten i plan blev ca 2 cm och mätosäkerheten i höjd var inom 5 cm. Jämförelse med statiska mätningar påvisade medelavvikelser på ca 20 mm plan och 25 mm i höjd. Under mätningarnas gång varierade avvikelser: i plan inom

± 3 cm, och i höjd inom ± 5 cm. Författarna drar en slutsats att PPP-metoden är en tillförlitlig metod för rörelsemätningar på jordskred.

4.3 MARKBASERAD LASERSKANNING

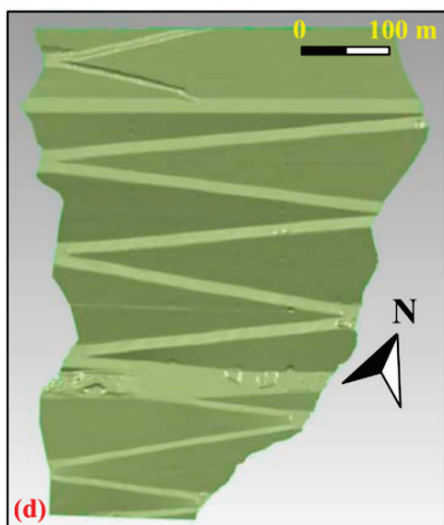
Under de två senaste decennierna har många studier med markbaserad laserskanning utförts på både naturliga och anlagda objekt med lovande resultat. En intressant studie utförd relativt nyligen på en stor fyllningsdamm Changheba, se Figur 4-3, i sydvästra Kina redovisas i Xu et al. (2018). Hela dammen skannades vid två tillfällen – oktober 2016 och april 2017 – med en skanner från Riegl.



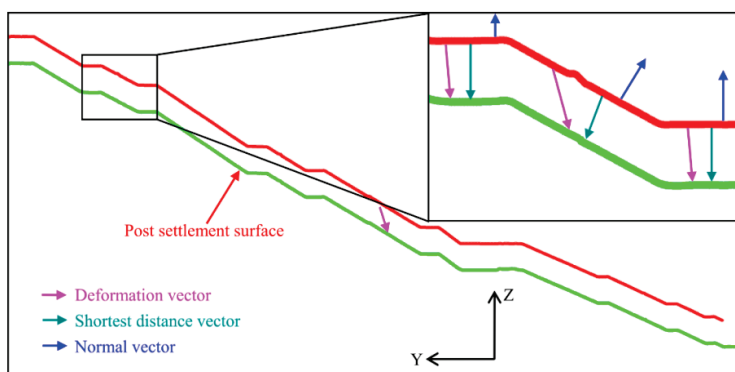
Figur 4- 3 Till vänster: damm Changheba. Observera vägen som går i ett serpentinmönster på dammens överyta. Till höger: punktmolnet från ett av mättillfällena. Källa: Xu et al. (2018). © Författarna. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Punktmolnen från båda tillfällena georefererades till anläggningens stomnät och bearbetades till 3D-modeller, se Figur 4-4. Det som kännetecknar denna studie är att modellerna skapades med hjälp av matematiska funktioner, s.k. NURBS (non-uniform rational B-splines) som används i datorgrafiken. Fördelen med detta sätt att modellera, jämfört med nuförtiden mer eller mindre "traditionella" triangelmodeller ("meshes"), är flexibilitet och reducering av "mätbruset" i skanningsdata. Detta ger goda förutsättningar för efterföljande deformationsanalys.

Eftersom genom laserskanning fås en heltäckande 3D-modell är det möjligt att studera deformationer över hela dammen. Ett annat sätt att studera deformationer är att skapa profiler från 3D-modellerna, vilket användes i Xu et al. (2018) enligt principen illustrerad i Figur 4-5. Enligt denna princip beräknas deformationer som kortaste avstånd mellan 3D-modellerna. I studien undersöktes deformationer endast på dammens överyta nedströms.



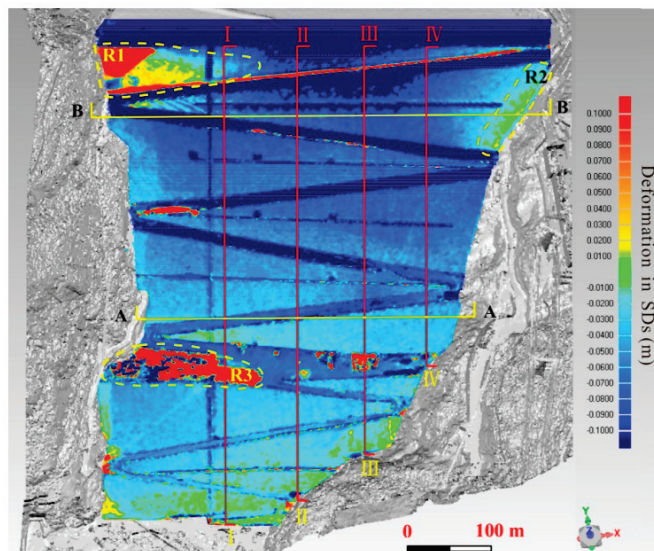
Figur 4- 4 En 3D-modell av dammen från ett av mätillfällena av Changheba damm. Källa: Xu et al. (2018). © Författarna. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Figur 4- 5 Principen för deformationsanalys baserat på profiler från 3D-modellerna i Xu et al. (2018). Z-axeln är vertikal och Y-axeln är parallell mot flodens riktning. Källa: Xu et al. (2018). © Författarna. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Fördelningen av deformationer över hela dammen visas i Figur 4-6. I studien konstaterades att det skedde sättningar över hela dammen mellan oktober 2016 och april 2017, och storleken på dessa ökade från botten till toppen av nedströmssidan. Ett annat resultat var att deformationer i mitten generellt var större än vid anfangen, se Figur 4-6.

I Figur 4-6 syns även tre mindre områden, R1 – R3, med positiva förändringar d.v.s. med ytan i april 2017 liggande högre än motsvarande yta i oktober 2016. I område R3 skedde byggnation i perioden mellan mätillfällena. I områdena R1 och R2 var det "hål" i punktmolnet insamlat i april 2017, och det interpolerades vid 3D-modelleringen. Som resultatet av deformationsanalysen hade påvisat blev denna interpolering inte särskilt lyckad, och "deformationer" i områdena R1 och R2 avspeglar således inte verkliga förändringar på dessa ställen. Författarna drar en slutsats att markbaserad laserskanning "förstärkt" med NURBS-modellering är en effektiv och precis metod för deformationsövervakning.



Figur 4- 6 Fördelningen av deformationer över dammen. Linjerna I – IV samt A-A och B-B är profiler för analys av deformationerna. Källa: Xu et al. (2018). © Författarna. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

4.4 UAS-FOTOGRAMMETRI

Under studiens gång har vi inte hittat några publikationer som redogör för användning av UAS för rörelseövervakning av fyllningsdammar. Däremot har flera studier hittats där tekniken användes för rörelsemätning på jordskred som har liknande egenskaper som fyllningsdammar. Av denna anledning kan det vara relevant att belysa resultat av dessa studier i denna rapport.

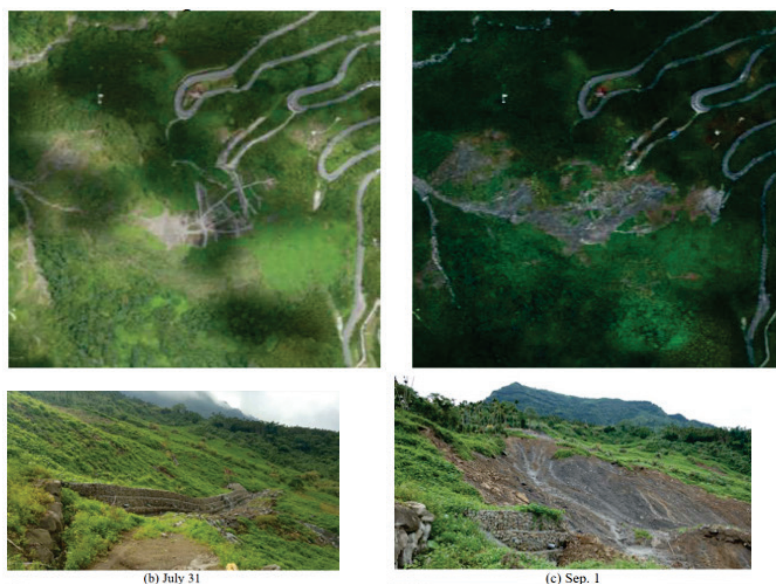
Lindner et al. (2015), Rau et al. (2019) och Hung et al. (2019) har testat att använda UAS för rörelseövervakning av jordskred. Den första studien genomfördes på ett aktivt jordskred i norra Österrike. Flyghöjden varierade mellan 80 och 100 m. I undersökningen var jordskredsområdet uppdelat i två delar där det totalt utfördes nio flygningar med en oktokopter (d.v.s. en drönare med 8 rotoror) utrustad med en digitalkamera med 18 Mpix upplösning. Flygningarna utfördes under perioden juni 2013 – juni 2014, och fem av flygningarna utfördes under en period på bara tio dagar. För georeferering mättes mellan åtta och 26 referenspunkter med GNSS.

Genom fotogrammetriska metoder hade flygbilderna från varje tillfälle bearbetats till digitala ytmodeller och ortofoton med 10 cm markupplösning. Som har påvisats i studien kunde en lägesosäkerhet i höjd på 10 cm i ytmodellerna uppnås. De framställda produkterna låg sedan till grund för detektering och övervakning av sprickor och ändringar på jordytan, samt skatta hastigheter hos jordflödet i området. Ytmodellerna kunde användas för att massberäkna jordflödet. Bland annat var det möjligt att detektera ett litet område med betydande flöde (3 - 10 cm/dag) av jordmassor som hade missats om en punktbaserad metod t.ex. GNSS hade använts. Författarna drar en slutsats att UAS är en väl lämpad och kostnadseffektiv metod för rörelseövervakning av jordskred.

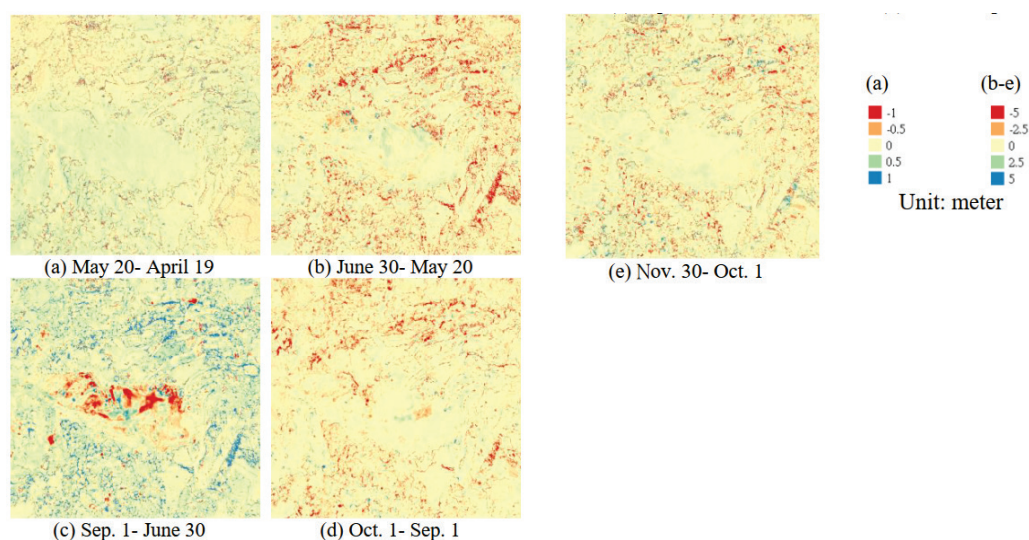
De två andra studierna utfördes på två olika jordskred i Taiwan. Rau et al. (2019) och en obemannad helikopter användes. Farkosten var utrustad med ett egenutvecklat sensorsystem med tre integrerade kameror, skapat för att kunna

täcka ett större område per bild. Totalt utfördes sex flygningar under perioden april 2018 – november 2018, från två flyghöjder – 75 och 200 m. Den lägre flyghöjden användes för att täcka jordskredsområdena och intilliggande vägen med högre detaljnivå, medan den högre flyghöjden användes för att få med hela undersökningsområdet. Georefereringen utfördes även i detta fall med hjälp av referenspunkter inmätta med GNSS.

Liksom i studien av Lindner et al. (2015) togs det fram digitala ytmodeller och ortofoton av det fotograferade området för att användas i förändringsanalysen. I studien skattades lägesosäkerheten i ytmodellerna till 3 – 10 cm beroende av marktyp. Exempel på ortofoton samt på resultat av jämförelseanalysen visas i Figur 4-7 och 4-8. Observera stora förändringar i området som skedde mellan flygtillfällena 30 juni och 1 september p.g.a. ett kraftigt regn i slutet av augusti.

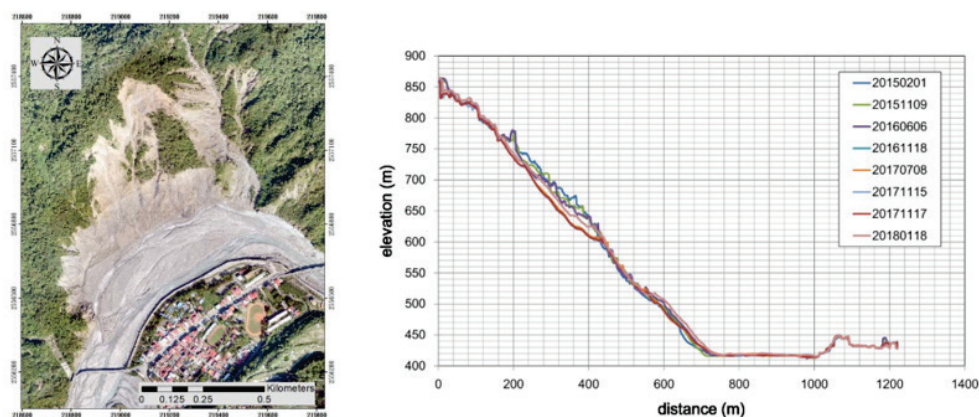


Figur 4- 7 Övre raden: Ortofoton från 30 juni (till vänster) och 1 september (till höger). Nedre raden: bilder tagna från marken som visar förändringen i området p.g.a. regnet. Källa: Rau et al. (2019). © Författarna. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Figur 4- 8 Differenser mellan digitala ytmodeller från de olika mättillfällena. Källa: Rau et al. (2019). © Författarna. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Hung et al. (2019) använde en egenbyggd drönare utrustad med en digitalkamera för att övervaka rörelser på ett stort jordskred i södra Taiwan, se Figur 4-9 (vänster). Forskargruppen utförde fler än tio flygningar under perioden 2015 – 2018 från 300 – 500 meters flyghöjd. Flygbilderna georefererades med hjälp av referenspunkter inmätta med GNSS och bearbetades till digitala ytmodeller och ortofoton som användes för att studera förändringar i området. Ett resultat av analysen visas i Figur 4-9 (höger). Sedan 2018 hade också laserskanning från UAS (baserat på en skanner från den österrikiska tillverkaren Riegl) använts i studien med lovande resultat. Enligt författarna hade metoden mätosäkerhet på ca 5 cm i höjd för både fotografering och laserskanning från UAS. Det bör nämnas att flygning på så höga flyghöjder som användes i Hung et al. (2019) och Rau et al. (2019) (200 – 500 m) inte är tillåten i EU (maximal flyghöjd 120 m).



Figur 4-9 Till vänster: området där studien utfördes. Till höger: vertikala profiler genom jordskredet som visar dess utveckling över tid, baserat på digitala ytmodeller från fotografering med UAS. Källa: Hung et al. (2019). © Författarna. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

4.5 INSAR OCH MARKBASERAD SAR

4.5.1 InSAR

Resultat av InSAR-mätningar är idag mer tillgängliga än någonsin tack vare flera olika radarsatelliter i omlopp. De viktigaste av dessa är europeiska satelliter Sentinel-1 som lanserades inom ramen för EU:s rymdprogram Copernicus. Data från Sentinel-satelliterna finns tillgängliga gratis, vilket under de senaste åren har lett till utveckling av en rad regionala och nationella s.k. Ground Motion Services (GMS) i Europa. Förenklat beskrivet är en GMS en webbtjänst som gör det möjligt för allmänheten att ta del av resultatet av deformationsövervakning med InSAR. De två viktigaste produkterna ur en GMS är:

- Rörelsehastigheter för varje mätpunkt över en tidsperiod.
- Tidsserier för rörelser i varje mätpunkt.

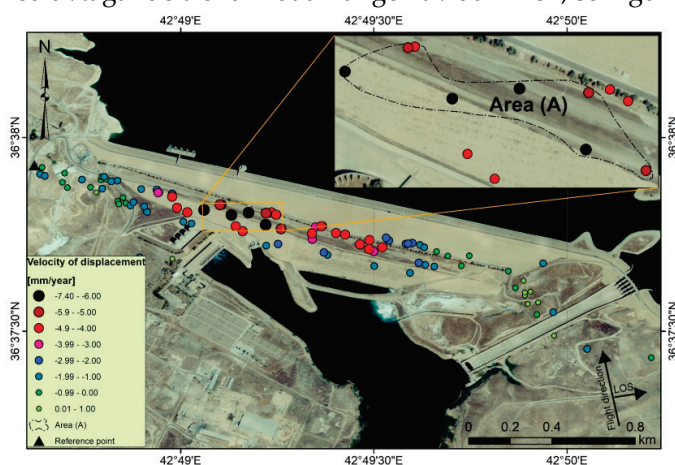
Gemensamt för alla befintliga GMS är att InSAR-data valideras genom oberoende mätningar (t.ex. markbaserade geodetiska mätningar) för att säkerställa datakvalitet.

Idag är rikstäckande GMS implementerade i Norge (InSAR Norway), Tyskland (BBD) och Nederländerna (Bodemdalingskaart). Danmark har nyligen tagit fram två rikstäckande sättningskartor medan en webbtjänst för tillhandahållande av data är under utveckling. I Italien finns tre regionala GMS som baseras på data från Sentinel-satelliterna och en nationell GMS finns sedan tidigare baserat på data från äldre radarsatelliter. Som en intressant tillämpning av en GMS kan det nämnas att i Norge kunde över 100 nya potentiella jordskred upptäckas strax efter lansering av InSAR Norway.

I denna kontext ska det nämnas att en nationell GMS-tjänst InSAR Sweden även har lanserats i Sverige under det här projektets gång, i slutet av 2021 (<https://insar.rymdstyrelsen.se>). Sedan tidigare finns det en webbtjänst Sättningskartan (<https://sattningskartan.se/sv/>) som täcker södra Sverige (från Skåne till norra Uppland). Tjänsten har skapats av WSP i samarbete med nederländska företaget SkyGeo och innehåller data från mars 2017 till mars 2021.

En heltäckande GMS för hela Europa (European GMS, EGMS) är nu under utveckling. Avsikten är att första produkterna kommer att vara tillgängliga under första kvartalet 2022. EGMS förväntas att vara fullt operationell i tredje kvartalet 2022. EGMS ska tillhandahålla rörelsekartor och tidsserier från februari 2015 till januari 2021 (start av databearbetningen), med uppdatering en gång per år. Det som är viktigt att ha i åtanke, i svensk kontext, är att i nordliga regioner kommer databearbetningen för EGMS bara att innefatta radarbilder tagna under snöfria perioder. Detta begränsar deformationsanalys för dessa områden.

Förutom användning av InSAR-data som är fritt tillgängliga via en GMS finns det flera studier där InSAR-data bearbetades i egna programvaror. Två av dessa studier som utfördes på fyllningsdammar redogörs för nedan. I den första studien användes InSAR-data från en av Sentinel-satelliterna för att undersöka rörelser på Mosuldammen i Irak (Othman et al., 2019). Baserat på data för perioden mellan oktober 2014 och juni 2019 kunde forskargruppen bestämma rörelsehastigheter upp till 7,4 mm/år (sättningar) med mätosäkerhet på ca 0,6 mm/år. De största deformationerna (svarta och mörkröda punkter) upptäcktes i dammens centrum, med avtagande trend mot anfangen av dammen, se Figur 4-10.



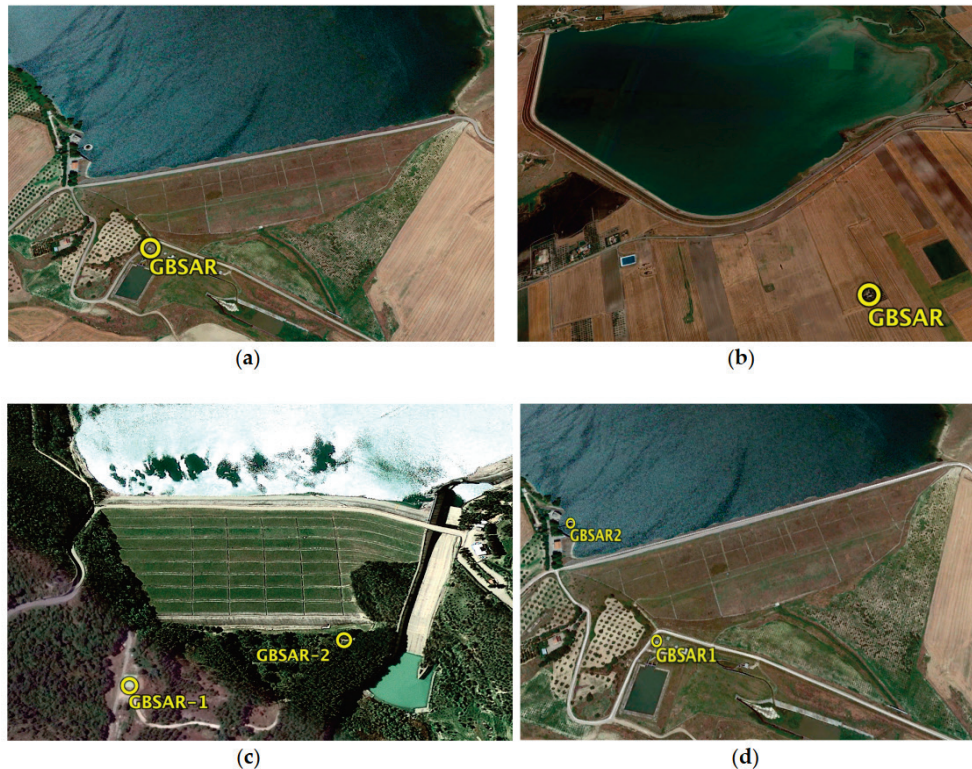
Figur 4-10 InSAR-mätpunkter färgsatta efter beräknade deformationshastigheter. Område A är där de största sättningarna konstaterades. Källa: Othman et al. (2019). © Författarna. Licensinnehavare: MDPI, Basel, Schweiz. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Resultatet av InSAR-mätningarna vid Mosuldammen har också jämförts med oberoende GNSS-mätningar varav en överensstämmelse på ca 1 mm/år kunde konstateras.

En annan intressant studie utfördes på dammen Campolattaro i centrala Italien (Liberata Ullo et al., 2019). Även här användes data från Sentinel-satelliterna för att studera sättningar på dammen under perioden maj – december 2016. Som resultat av undersökningen kunde sättningar på upp till 7 mm konstateras, vilket stämde väldigt bra med resultatet av traditionell avvägning (maximala avvikelser på ca 2 mm, vilket betydde att resultat av övervakningen kunde anses likvärdiga). Resultatet av båda studierna bekräftar InSAR-metodens tillförlitlighet för deformationsövervakning.

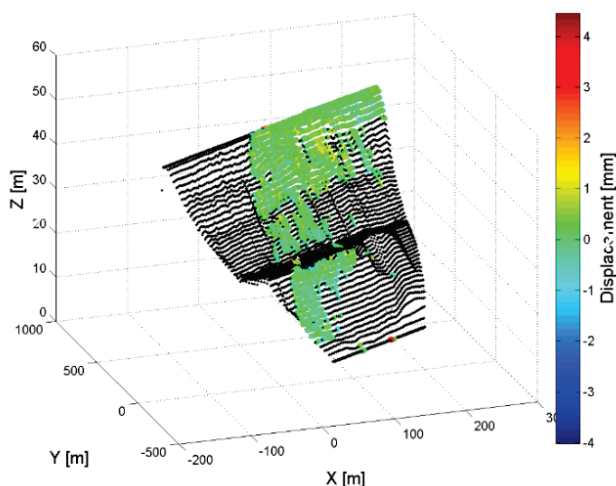
4.5.2 Markbaserad SAR

Det hör inte till vanligheterna att använda markbaserad SAR i produktion utan tekniken har hittills huvudsakligen använts inom forskning. Ett intressant forskningsprojekt där markbaserad SAR har testats för deformationsövervakning av fyllningsdammar har genomförts på fyra dammar i södra Italien (Di Pasquale et al., 2018). Undersökningarna gjordes vid flera olika tillfällen under 2013 och 2014. Författarna hade testat olika sätt att samla in data, med både en och två uppställningar på olika ställen i förhållande till dammen, se Figur 4-11.



Figur 4- 11 Uppställningar av markbaserad SAR (ground based (GB) SAR) på fyra olika dammar i södra Italien. Källa: Di Pasquale et al. (2018). © Författarna. Licensinnehavare: MDPI, Basel, Schweiz. Reproducerat enligt CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

En visualisering av horisontella rörelser på en av dammarna i södra Italien visas i Figur 4-12. I projektet kunde rörelser så små som 1 – 2 mm upptäckas. Observera att rörelser bara kunde detekteras på delar av dammen där det gick att få tillförlitliga retursignaler från ytan.



Figur 4- 12 Horisontella rörelser på en av dammarna i södra Italien. Källa: Di Pasquale et al. (2018).
© Författarna. Licensinnehavare: MDPI, Basel, Schweiz. Reproducerat enligt CC BY license
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

En av slutsatser som författarna kunde dra i studien var att skanning från två uppställningar nedströms (Figur 4-11 c) kunde hjälpa till att enklare detektera rörelser i övertäckningen mellan data från uppställningarna, jämfört med skanning från bara en uppställning. En annan slutsats, från skanning från uppställningar både upp- och nedströms (Figur 4-11 d), var att detta sätt att mäta med markbaserad SAR kan hjälpa till att upptäcka olika rörelsemönster på upp- och nedströmsytan och verifiera om dammen beter sig som en rigid kropp.

4.6 SWECO NEDERLÄNDERNA: ERFARENHETER INOM DEFORMATIONSÖVERVAKNING

Diskussionen i denna rapport har hittills handlat huvudsakligen om utförande av deformationsmätningar. För att kunna kommunicera resultatet av deformationsmätningar på ett överskådligt sätt behöver effektiva presentationsverktyg användas. Ett exempel på sådant verktyg är webbtjänsten Monitor Platform som har utvecklats av Sweco Nederländerna. I verktyget kan användaren lägga in en 3D-modell av den anläggning som övervakas och i modellen visa resultatet av rörelsemätningar som utförs. I webbtjänsten är det sedan möjligt att visualisera deformationsförloppet för att få en klar bild av hur objektet beter sig under den tid som rörelsemätningarna pågår.

Ett bra exempel på användning av Monitor Platform är kontinuerliga rörelsemätningar på gång- och cykelbron Ritsumasyl i norra Nederländerna, se Figur 4-13. Det är en bro som är till 80 % tillverkad av biobaserade material och invigdes i 2020. Bron är 66 m lång och 4 m bred och går över en kanal med aktiv

fartygstrafik. Därför är den öppningsbar (genom svängning) för att låta fartygen passera.

För att säkerställa bronns hållbarhet har det installerats ca 200 fiberoptiska sensorer i konstruktionen, vilka gör kontinuerliga mätningar av alla förändringar i bronns form. Sensorerna samlar in tre miljarder datapunkter årligen, vilket ger ett bra underlag för att veta hur bron "mår" under alla förhållanden (väder och belastningar). Detta skapar också förutsättningar för projektering av flera liknande anläggningar i framtiden (Sweco Nederländerna, 2022). Resultatet av övervakningen presenteras överskådligt i Monitor Platform i realtid. Det är också möjligt att "spela upp" historiska observationer för att se hur bron betedde sig under en viss tidsperiod.



Figur 4- 13 Ett utsnitt ur webbtjänsten Monitor Platform för bron Ritsumasyl. Källa: <https://www.biobasedbrug-ritsumasyl.nl/biobased-composite-brug-ritsumasyl/3d-model>.

5 Tillämpning av rörelseövervakning på svenska dammar

För att få en representativ bild av och en bättre insikt i hur svenska dammägare använder sig av moderna mätmetoder valdes en dammägare (Vattenfall) som har kommit långt när det gäller att utvärdera ny teknik. Inom ramen för undersökningen har det genomförts en intervju och en workshop med representanter från dammägaren. Det framgick att dammägaren fortfarande använde traditionell avvägning som den huvudsakliga metoden för rörelsemätningar på sina dammar, vilket de anser vara den mest tillförlitliga och billigaste metoden för att detektera rörelser av dammar. Dammägaren har även testat mer modern teknik på vissa anläggningar.

Redan 2002 genomfördes experiment med statiska GNSS-mätningar på Storfallsdammen (en 135 meters lång betongdamm) i Älvkarleby för att utvärdera metodens mätosäkerhet (Bernstone, 2006). Det utfördes tester med både simulerade rörelser i plan samt rörelser av en punkt på dammens krön. De senare mätningarna utfördes under drygt tre månaders tid (september – december 2002) med en baslinje där referensstationen etablerades på en stabil plats (berg) ca 290 m från observationspunkten på dammen. Mätningarna överfördes och efterberäknades i en specifik programvara. Resultatet av mätningen påvisade att det var möjligt att detektera rörelser i plan på millimeternivå samt att det var möjligt att följa temperaturpåverkan på position av dammkrönet över den tid som mätningarna pågick.

Dammägaren har även testat hydrostatisk nivellering på en fyllningsdamm, i anslutning till dess betongkonstruktion. Analys av mätningarna pågår i skrivande stund men kvaliteten hos de utförda mätningarna verkar inte vara enligt förväntan.

Det framgick också att dammägaren har utfört flygningar med UAS utrustande med både kamera och laserskanner, för att skapa 3D-modeller över dammanläggningar. UAS-inmätningen som utfördes med en laserskanner georefererades mot kända punkter bestämda utifrån ett inmätt stornät på marken. Det senare är en viktig förutsättning för att säkerställa kvalitet på mätdata och kunna integrera dem med andra typer av mätningar. Samtidigt ser dammägaren problem med att anlägga stornät på en stor damm när avståndet mellan stompunkterna är för stort eftersom detta kan ge upphov till fel i den modell som baseras på UAS-inmätningen.

Den största nytta som dammägaren ser med UAS-tekniken är att noggrant dokumentera hela dammen i 3D och därmed skapa en s.k. "referensmodell" som ett underlag för framtida rörelsemätningar och händelser. De senare behöver inte nödvändigtvis utföras med UAS utan där kan andra metoder (inkl. traditionella markbaserade metoder) vara aktuella. Dammägaren har en vision att skapa "nollmodeller" baserat på UAS-data för alla sina dammar i Sverige.

Markbaserad laserskanning har testats inom ramen för ett forskningsprojekt på en experimentell damm i Älvkarleby (dammhöjd 4 m) under ca två års tid med ca

sex mätningar utförda vid olika tillfällen. Frekvensen av mätningarna var händelsestyrd. Georefereringen utfördes mot fasta punkter på en närliggande betongkonstruktion där rörelser kunde uteslutas. Dammägaren var nöjda med studiens resultat som påvisade att inga rörelser ägde rum.

Samtidigt har dammägaren inte gjort några laserskanningsmätningar på de verkliga dammarna, vilket berodde på att metoden brukade bedömas för kostsam för en större damm. En annan faktor som gör laserskanningstekniken mindre försvarbart för dammägaren är de stora datamängder som genereras vid en laserskanningsmätning på en större damm och därmed behovet att hantera och lagra stora 3D-modeller. Sammanfattningsvis ser dammägaren inget behov att dokumentera hela anläggningen med den detaljnivå som laserskanning ger när det rör sig om en stor damm. Däremot anses tekniken vara lämpligare för 3D-dokumentation av mindre dammar samt specifika delar av större dammar, framför allt för att skapa underlag för ritningsframställning och beräkningar.

Dammägaren har också erfarenhet av mätningar under vattenytan. De har använt sig av ekolodning samt undervattenfotogrammetri för att utvärdera tillstånd hos betongkonstruktioner, dammluckor och dåligt berg under vatten. Det har också utförts jämförelseanalyser baserat på data från ekolodning. Det har dock konstaterats att det ska vara stora skillnader mellan de olika tillfällena för datainsamling t.ex. stora ras på slänten under vattnet, för att metoden ska fungera för rörelseövervakning.

Dammägaren tror på InSAR-tekniken och har bl.a. testat den i en experimentell studie på Ajaure damm, en stor fyllningsdamm i Norrland, med lovande resultat (Lier, Ø.E et al, 2015). Bolaget är även involverat i ett utvecklingsprojekt som handlar om InSAR, tillsammans med bl.a. Trafikverket. Samtidigt anser dammägaren att det är viktigt att ha bra förståelse för hur algoritmerna för beräkning av rörelser från InSAR-data fungerar.

När det gäller användning av ytbaserade metoder för rörelsemätningar ser dammägaren deras främsta potential i att fånga de globala rörelsemönstren på ytan, i storleksordning på centimeter- till decimeternivå. Det som är viktigt att ha i åtanke vid den typen av övervakningen är att ytan kan röra sig mer än dammens tät kärna p.g.a. väderpåverkan. Därför är det viktigt att filtrera den information som fås i samband med mätningarna för att få tillförlitliga resultat.

Enligt dammägaren är det svårt att generellt motivera regelbundna rörelsemätningar på fyllningsdammar med ytbaserade metoder, eftersom allt beror på vilken anläggning som är aktuell (dess storlek etc.). Ett möjligt scenario är användning av ytbaserade mätningar på de ställen på dammen där andra typer av sensorer har påvisat rörelsetrender. En beställare av rörelsemätningar på en fyllningsdamm behöver veta vilken slutprodukt (med tillhörande lägesosäkerhet, detaljnivå, anslutning till ett stornät etc.) som behövs. Detta är särskilt viktigt idag när det finns flera ytbaserade geodetiska metoder som kan generera stora mängder av data, eftersom de insamlade data behöver användas för olika typer av analyser och inte bara "för datas skull". Det är också viktigt att utvärdera utförarens kompetens inom geodetisk mätningsteknik och inte bara ta hänsyn till det offererade priset.

Dammägaren har även testat flera typer av metoder för rörelsemätning i dammkroppen. De intervjuade anser att inklinometern uppfyller ett viktigt syfte vid rörelseövervakning i dammkroppen med en hög noggrannhet, en beprövad teknik och möjligheter att mäta rörelser på olika nivåer. Vid en testanläggning i Älvkarleby har den nya tekniken SAA testats i en permanent installation. Dammägaren beskriver att de inte anser att SAA kan ersätta inklinometern, däremot kan SAA vara ett bra komplement. Fördelen med SAA är att det är möjligt att mäta rörelser i befintliga rör, t.ex. grundvattenrör, utan att genomföra en ny installation. Dammägaren beskriver att noggrannheten vid dessa mätningar inte är på inklinometerens nivå, men upprepade mätningar med SAA ger möjligheter att upptäcka rörelser i dammkroppen.

Dammägaren har även extensometrar i en fyllningsdamm för rörelseövervakning. De intervjuade beskriver att extensometrarna installerades för att övervaka eventuella sättningar som kunde uppstå vid dammsäkerhetshöjande åtgärder vid en fyllningsdamm. Dammägaren beskriver att extensometrar i fyllningsdammar endast har använts av dem om det finns ett specifikt syfte att övervaka, annars använder dammägaren oftast extensometrar i betongdammar.

6 Val av övervakningsmetod

6.1 ALLMÄNT

Ekström och Lier (2013) slog fast att det inte fanns någon mätmetod som gav bäst resultat vid rörelsemätningar på dammar. I skrivande stund, 9 år senare, kan denna slutsats bekräftas. Ingen av de metoder som har beskrivits i denna rapport kan ensam ge en tillförlitlig och heltäckande bild av deformationer som en fyllningsdamm kan utsättas för. Istället bedöms den mest effektiva lösningen vara en kombination av olika metoder som ger största möjliga nytta i övervakningen och möjlighet till korsvalidering av mätningar utförda med de olika metoderna.

För att övervaka rörelser i tåtkärnan finns det för närvarande inget alternativ till punktbaseerade metoder. Den traditionella avvägningen har fortfarande inte spelat ut sin roll och ger den lägsta mätosäkerheten i höjd bland de metoder som har diskuterats i rapporten. Dock har statiska GNSS-mätningar och automatiserad övervakning med totalstation en stor potential att ersätta avvägningen förutsatt att observationspunkterna kan realiseras med markeringar som förankras i tåtkärnan.

För att ge en vägledning för dammägare vid val av teknik för rörelseövervakning har tre tabeller tagits fram. I tabellerna sammanställs ett antal utvalda parametrar för att möjliggöra en generell jämförelse mellan teknikerna. I Tabell 6-1 och Tabell 6-2 sammanställs ett antal parametrar för rörelseövervakning på dammens yta och i Tabell 6-3 sammanställs ett antal parametrar för rörelseövervakning i dammkroppen.

Det bör också nämnas att, även om denna rapport redogör för flera avancerade metoder för rörelsemätningar, har den visuella inspektionen inte spelat ut sin roll. Samspelet mellan en visuell inspektion och de olika mätmetoderna är något som ska beaktas vid utformning av ett övervakningsprogram. Modern teknik såsom flygfotografering från drönare ger dock bra möjligheter att inspektera olika delar av dammanläggningen ur ett helhetsperspektiv, vilket kan ge bättre förutsättningar för att upptäcka t.ex. storskaliga sättningar i dammkroppen.

Tabell 6-1 Sammanställning av ett antal parametrar för rörelseövervakning på dammens yta – punktbaserade metoder.

Metod	Osäkerhetsnivå/ noggrannhet	Typ av rörelse som övervakas	Tidsåtgång för att genomföra mätning	Möjlighet till realtidsövervakning	Livslängd	Används på svenska dammar
Avvägning	mm	Vertikal	Långsammare än totalstation och GNSS. Första mätningen tar längre tid pga. anslutning till höjdsystemet.	Nej	Mätmetodik: Så länge dubbarna är stabila	Ja
Totalstation	mm	Horisontell och vertikal	Snabbare än avvägning, långsammare än GNSS i RTK-läge	Ja	Totalstation: över 5 år, längre vid god service Mätmetodik: Så länge markeringar är stabila	Ja
GNSS statisk	mm	Horisontell och vertikal	Kräver relativt långa observations-serier per punkt t.ex. 2 tim (flera punkter mäts samtidigt)	Nej	Mätmetodik: Så länge markeringar är stabila	Ja, men begränsas av kontakt till satelliter
GNSS i RTK-läge	cm	Horisontell och vertikal	Mycket snabbare än avvägning och totalstation.	Ja	Mätmetodik: Så länge markeringar är stabila	Ingen uppgift
Automatiserad övervakning med integrerade system	Integrerade system med olika osäkerhetsnivåer, från mm-nivå och uppåt	Horisontell och vertikal	Automatiska system. Initialt krävs tidsåtgång för installation av systemet men när det är på plats görs mätningar automatiskt.	Ja	Sensorers livslängd beror på installationsmiljön, vanligen flera år	Ja

Tabell 6-2 Sammanställning av ett antal parametrar för rörelseövervakning på dammens yta – ytbaserade metoder.

Metod	Osäkerhets-nivå/ noggrannhet	Typ av rörelse som övervakas	Tidsåtgång för att genomföra mätning	Möjlighet till realtids-övervakning	Livslängd	Används på svenska dammar
Markbaserad laserskanning	Mätosäkerhet på mm-nivå, absolut lägesosäkerhet ofta mindre än 20 mm	Horisontell och vertikal	Ungefär som totalstation och markbaserad SAR men med betydligt högre detaljnivå	Nej	Obegränsad, skanner använder inga fasta punkter	I begränsad omfattning
UAS	Inom dm-nivå; cm-nivå vid bra förhållanden	Horisontell och vertikal	Beror på kravställd noggrannhet och sensor, mätning vanligen genomförd under 1 dag	Nej	Obegränsad, skanner använder inga fasta punkter	I begränsad omfattning
InSAR Sweden på webben	mm (relativa rörelser)	I satellitens siktlinjes-riktning	Automatiskt system, data finns tillgängliga på webben	Nej	Beror på satelliternas livslängd	InSAR-tekniken användes i begränsad omfattning innan InSAR Sweden lanserades
Markbaserad SAR	mm	I instrumentets siktlinjes-riktning	Ungefär som totalstation och markbaserad laserskanning men betydligt lägre detaljnivå	Ja	Obegränsad, instrumentets använder inga fasta punkter	Ingen uppgift

Tabell 6-3 Sammanställning av ett antal parametrar för rörelseövervakning i dammkroppen.

Metod	Osäkerhetsnivå/noggrannhet	Typ av rörelse som övervakas	Tidsåtgång för att genomföra mätning	Möjlighet till realtidsövervakning	Kostnad per mättillfälle	Installationskostnader (borrning + material/st)	Livslängd	Används på svenska dammar
Inklinometer	mm	Horisontell rörelse	Ca 0,5-1 h per rör	Ja	Instrument: 100 kkr, varje sond ca 20 kkr vid fast installation	Ca 4500 kr/m, för 25 m ca 112 000 kr + etableringskostnader för borrigg	Mer än 20 år	Ja
Extensometer	mm	Vertikal rörelse	Mätning genomförs automatiskt med givare	Ja	-	För ett extensometerhuvud med 4 - 5 ankare, fördelade på ca 25 m. Ca 105 000 kr + etablering borrigg	Mer än 20 år	Ja, i liten omfattning
Sättningsgivare	mm	Vertikal rörelse	Mätning genomförs manuellt med givare	Ja	Manuellt instrument ca 10 000:-	Sättningsgivare ca 25 m lång, med givare varje meter ca 95 000 kr + Etablering borrigg.	Mer än 20 år	Ja, i liten omfattning
Optisk fiber	mm	Horisontell och vertikal rörelse	Manuell mätning: Själva mätningen går fort, däremot behöver mätdata bearbetas och analyseras	Ja	Instrument 250 000-500 000:- för permanent installation	Ca 100 kr/m + schakt och fyllnads-kostnader	Mer än 20 år	Ja
SAA	cm-nivå, beror dock på storleken på det rör där mätning utförs	Horisontell och vertikal rörelse	Ca 15 min per rör	Ja	Instrument: 200 kkr	Ingen uppgift	Ny teknik som endast funnit ett fåtal år	Endast testdamm

6.2 EKONOMISKT PERSPEKTIV

I detta avsnitt ges först ett försök att erfarenhetsmässigt uppskatta hur mycket tid några olika typer av metoder för rörelseövervakning tar att genomföra. Några typiska uppdrag används för att beskriva hur lång tid de tog. Därefter tas en mer generell diskussion om kostnadsaspekter. Följande kommer att behandlas:

- Etablering stornät, inmätning totalstation och laserskanning, mindre damm.
- Etablering stornät och laserskanning, större damm.
- Etablering stornät och laserskanning, invändigt i en damm.
- Automatisk övervakning med integrerade system.
- Laserskanning och UAS/drönarfotogrammetri med extern utförare eller i egen regi.

För diskussionen i detta kapitel gäller följande definition enligt ICOLD:

Stor damm: En stor damm är en damm med en höjd av 15 meter eller mer från lägsta fundament till krön eller en damm mellan 5 meter och 15 meter i höjd som rymmer mer än 3 miljoner kubikmetervatten.

Ett mätuppdrag kan grovt delas upp i följande delar:

- Planering.
- Genomförande i fält.
- Beräkning.
- Leverans.

Oavsett storlek eller komplexitet på uppdraget så innefattar det dessa delar och därför följer tidsuppskattningen för respektive del denna uppdelning. Kravet på stornätet sätter kravet på metodvalet, samt om nätet ska vara georefererat eller lokalt anslutet.

6.2.1 Etablering stornät, inmätning totalstation och laserskanning, mindre damm

Nedan, se Figur 6-1, visas ett exempel på en liten damm (ca 100 m lång), vid dammen finns en brunn i vilken mätningar görs med jämna mellanrum för att upptäcka eventuella rörelser. En befintlig fix fanns på plats (lokalt höjdsystem).

Planering: 1 dag, samla in underlag, förbereda mätning mm.

Fältmätning: 1 dag (exkl. restid). Eftersom det viktiga är att se relativa rörelser markerades tre nya punkter i berg. Punkterna mättes in med totalstation som ett mindre fristationsnät och utjämnades spänningsfritt. Punkterna mättes även med RTK för att kunna skapa ett approximativt samband till svenska nationella SWEREF-referenssystemet genom inpassning. En RA-fix finns markerad i en byggnad i närheten. Höjden hämtades trigonometriskt från den för ett ge ett samband till RH2000, vilket medger ytterligare kontroller.

Beräkning och leverans: 1 dag.

Totalt: 1 person, 3 dagar.



Figur 6-1. Ett stomnät vid en liten damm.

Om absolut anslutning hade varit ett krav hade anslutning mot riksnätet i höjd krävts, det hade ju inneburit att ytterligare en resurs behövts i fält.

Återkommande mätningar

Med denna metodik kan kontrollen utföras i både plan och höjd från det nya nätet. En ytterligare kontroll i höjd kan göras mot befintlig fix. Den löpande kontroll som görs av dammen tar mindre än 1 timme för varje tillfälle.

Denna damm laserskannas också regelbundet, skanningen tar på plats 1 timme och genomförs samtidigt som den vanliga kontrollen. Eftersom de genomförs samtidigt mäts måltavlor för registreringen in i samband med att mätbrunnen mäts in. Därför tillkommer ingen ytterligare tid för det momentet. Beräkning och kontroll av punktmoln samt jämförelse mot tidigare skanningar och rapportskrivande tar 1 dag på kontoret.

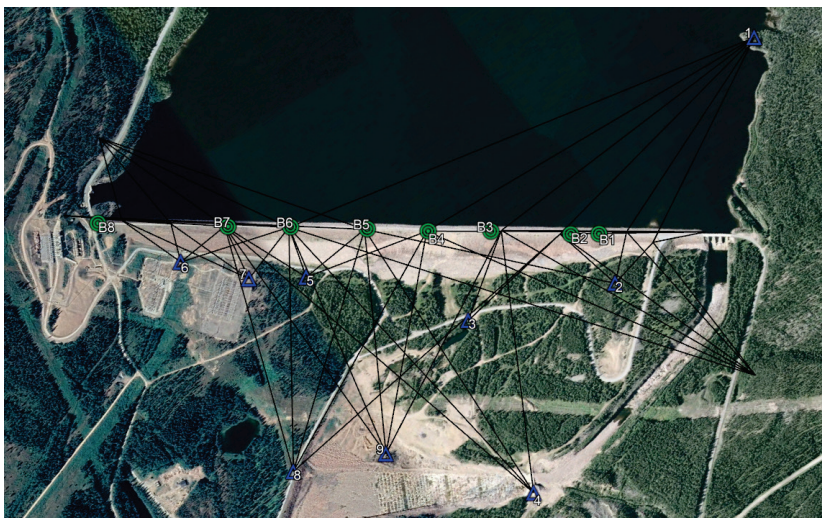
6.2.2 Etablering av stomnät och laserskanning, större damm

Dammen nedan, se Figur 6-2, är ca 1800 m lång. De åtta gröna cirkelarna som är markerade är brunnar där det utförs rörelsemätningar. Uppdraget bestod i att skapa ett nytt stomnät kring dammen så att brunnarna kunde mätas in med hjälp av fria stationer i stället för som tidigare med en variant av polygontåg från kända punkter.

Planering: 2 dagar. Planeringen innebar att ha några möten med beställaren, simulera nätet och ta fram ett förslag i form av en metodbeskrivning.

Fält: 4 persondagar. Fältdelen innefattade markering (1 dag för två personer), då markerades 9 punkter. Hade det krävts postament eller liknande hade markeringen tagit betydligt längre tid. Mätningen utfördes av 2 personer på 1 dag.

Beräkning och leverans: 1 dag.



Figur 6-2. Ett stonnät vid en större damm.

All mätning sker nu som fria stationer och ingen avvägning sker. Dock finns befintliga fixar om kontroller ska utföras. Ska en absolut anslutning göras, skulle det innebära en dag för planläget. Riksavvägningen går över denna damm, så egentligen krävs ingen extra tid i fält för att skapa anslutning till RH 2000. Allt beror på hur utföraren planerat uppdraget.

De flesta dammar har just bra markerade fixar och någon höjd i en vattendom som har en relation till ett höjdsystem, så en kontroll mot riksnätet skulle egentligen bara behöva utföras vid första tillfället. Alternativt sker det med känt samband till RH 2000 och endast en verifiering av sambandet med RTK.

En viktig aspekt gällande stonnäten är vad mätningarna ska användas till. Om mätningarna ska vara underlag för framtida ombyggnationer kan det krävas helt andra markeringar och uppbyggnad än som i exemplet ovan. Det viktiga bör dock vara att etablera ett större övergripande nät, alltså själva kontexten av stonnät, som sedan kan växlas ner för de kommande projekten.

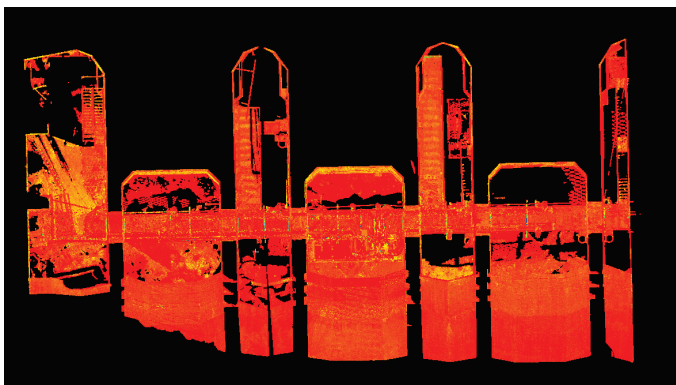
När stonnätet är etablerat kan det användas vid en laserskanning. Att laserskanna stora dammar utvändigt kan vara väldigt komplext eftersom det inte går att komma runt så som önskas. Att uppskatta tidsåtgången för en laserskanning är svårt eftersom det beror på så många faktorer t.ex.:

- Syftet med inmätningen.
- Storlek på damm.
- Höjdskillnad.
- Krav på mätosäkerhet/toleranskrav.

6.2.3 Etablering av stonnät och laserskanning, invändig i en damm

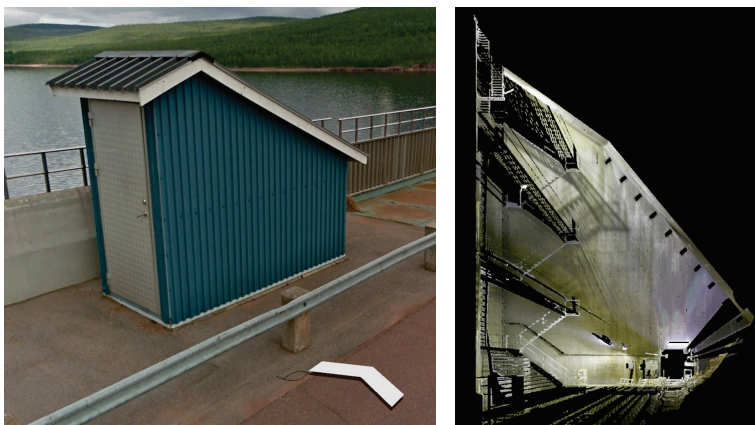
Det svåra är om beställaren önskar ett stonnät invändigt i en damm, då det ofta är tunnlar och stora höjdskillnader. I Figur 6-3 visas resultat av en laserskanning av en tunnel som går höger-vänster i bild och sju större rum. Det är ca 50 m från ena

sidan till den andra, och skanningen tog en halv dag att utföra. Skulle ett stomnät etablerats hade det nog i sig krävt två dagar för att bara överföra det ner till platsen.



Figur 6-3. En vy av nivå invändigt i en betongdamm, sett från ovan.

För att komma till platsen ovan gick utföraren in i en dörr på "markplan", se Figur 6-4, till vänster, för att sedan gå i en trappa 30 m ner i dammen, se Figur 6-4, till höger.



Figur 6-4. Till vänster: ingång till insidan av dammen. Till höger: trappor för att komma till nivån som skulle skannas.

Att "hålla ihop" ett sådant nät är väldigt komplext och kräver en riktigt bra planering och bra mätningar.

6.2.4 Automatisk övervakning med integrerade system

Användning av integrerade system för automatisk övervakning kräver en startkostnad i form av etablering av systemet på plats. I dagsläget är dessa system ganska dyra eftersom de kräver avancerad programvara som är den kostnadsdrivande delen av systemet. Till exempel kostar GOCA-programvaran, med stöd för totalstationer och GNSS-mottagare (inkl. moduler för databearbetning, analys, larmhantering och sensorkommunikation), 25 000 EUR (R. Jäger, projektledare GOCA, privat kommunikation). Om endast totalstationer eller GNSS används blir kostnaden mindre. När systemet väl är på plats sker dock

övervakningen automatiskt utan att personal behöver vistas i fält, utom eventuellt för underhåll av systemet.

Användning av GNSS-metoder som kräver tillgång till nationella geodetiska infrastrukturen (Swepos-nätet) som förvaltas av Lantmäteriet kräver ett abonnemang. Kostnaden för det varierar beroende på hur "aktivt" denna infrastruktur "brukas". Efterberäkningstjänsten kostar f.n. 1000 kr/år per användare (Swepos, 2022) och då finns det möjlighet att skicka in sina egna observationer till Lantmäteriet för att få tillbaka beräknade koordinater. Om många punkter behöver mätas vid flera tillfällen kan det vara omständligt att utföra koordinatbestämning på detta sätt. I tjänsten ingår också möjlighet att efterberäkna NRTK-mätningar, vilket kan vara aktuellt när det saknas mobiltäckning vid måttillfället.

Om större flexibilitet önskas går det att teckna ett abonnemang på NRTK-tjänsten, vilket kostar f.n. 15 000 kr/år per anslutning. I detta fall fås obegränsat datauttag. Det finns också möjlighet att teckna ett tidsbegränsat abonnemang för 30 dagar (2000 kr/anslutning) eller 90 dagar (5000 kr/anslutning) (Swepos, 2022). Då kan mätningar utföras på egen hand och koordinater fås direkt.

6.2.5 Laserskanning och UAS/drönarfotogrammetri med extern utförare eller i egen regi

I dagsläget är det mest realistiska scenariot för användning av laserskanning och UAS/drönar-fotogrammetri av svenska dammägare att anlita externa utförare. De senare ska utföra planering, datainsamling och -bearbetning till en färdig produkt (ett punktmoln eller en terrängmodell) som överlämnas till beställaren. I utförarens arbete ska naturligtvis ingå kvalitetssäkring av den levererade produkten. Eftersom det finns flera olika utförare, stora som små, kan det offererade priset variera kraftigt. Som nämns i kapitel 5 är det viktigt för beställaren att säkerställa att utföraren har mätningsteknisk kompetens att leverera produkten av rätt kvalitet. Det kan t.ex. vara en bra idé att titta på referensprojekt.

Användning av laserskanning och UAS/drönarfotogrammetri i egen regi kräver stor startkostnad. I denna ingår anskaffning av hårdvara (t.ex. laserskanner eller UAS-system), vilket kan kosta några hundratusen kronor. Ytterligare behövs programvara för databearbetning och eventuellt en kraftfull dator som kan klara av att bearbeta och lagra de stora datamängder som ytbaserade metoder genererar. Moderna programvaror för fotogrammetri och laserskanning brukar också vara relativt dyra. Datainsamlingen i fält tar relativt kort tid (per ytenhet) men däremot krävs det längre tid för databearbetningen. Av dessa anledningar är användning av laserskanning och UAS/drönarfotogrammetri för rörelsemätningar i egen regi mindre vanligt än att tjänsterna köps av utförare.

7 Referenslista

Arvidsson, M. & Loveere Pettersson, T. (2020). *Utvärdering av mätosäkerhet i höjd för UAS med LiDAR*. Examensarbete på Högskolan i Gävle.

Barnes, J., Rizos, Ch. & Lee, H-K. (2005). *The Integration of GPS and Pseudolites for Bridge Monitoring*. In: Sansò F. (eds) *A Window on the Future of Geodesy*. International Association of Geodesy Symposia, vol 128. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27432-4_15

Barzaghi, R., Cazzaniga, N., Pinto, L. & Tornatoreet, V. (2016). *GNSS methods in dam monitoring: case studies and future perspectives*. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, 30 March – 1 April, Vienna, Austria.

Bernstone, C. (2006). *Automated performance monitoring of concrete dams*. Doctoral Thesis in Engineering Geology, Faculty of Engineering, LTH, Lund University.

Cifres, R., Cooksley, G. & Cifres, E. (2016). *Satellite Technologies for Dam Motion Monitoring*. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, 30 March – 1 April, Vienna, Austria.

Di Pasquale, A.; Nico, G.; Pitullo, A.; Prezioso, G. (2018). *Monitoring Strategies of Earth Dams by Ground-Based Radar Interferometry: How to Extract Useful Information for Seismic Risk Assessment*. *Sensors* 2018, 18, 244. <https://doi.org/10.3390/s18010244>

Ekström I. & Lier Ø.E. (2013). *Behovsanalys för rörelsemätningar för dammar*. *Elforsk rapport 13:61*. Elforsk.

Energiföretagen (2020). *RIDAS – Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet. Tillämpningsvägledning Kapitel 9. Fyllningsdammar*. Energiföretagen Sverige – Swedenergy – AB

Fell, R., MacGregor, P; Stapledon, D; Bell, G; Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams, 2nd edition*. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema

Frukacz, M., Presl, R. & Wieser, A. (2016). *Pushing the Sensitivity Limits of TPS-based Continuous Deformation Monitoring of an Alpine Valley*. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, 30 March – 1 April, Vienna, Austria.

Geometrik. (2021). *Sättningsmätare typ Geometrik*. Geometrik.

Geotechnical Observations. (2022). *Shape Array Brochure*. Geotechnical Observations/Measurand.

Hesselbarth, A. & Wanninger, L. (2020). *Towards centimeter accurate positioning with smartphones*. The European Navigation Conference ENC 2020, November 22-24, 2020, Dresden, Germany.

Horemuz, M. (2010). *Deformation measurements and analysis*. Lecture notes, KTH Royal Institute of Technology.

Lantmäteriet (2017). HMK – Flygburen laserskanning 2017.
<https://www.lantmateriet.se/hmk>

Lantmäteriet (2021). HMK – Terrester laserskanning 2021.
<https://www.lantmateriet.se/hmk>

Hung, C.-L. J., Tseng, C.-W., Huang, M.-J., Tseng, C.-M., and Chang, K.-J. (2019). *Multi-temporal high-resolution landslide monitoring based on UAS photogrammetry and UAS lidar geoinformation*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3/W8, 157–160, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-157-2019>, 2019.

ICOLD (2019). *Dam Surveillance Guide. Bullentin 158*. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema.

Jäger, R., Hoscislawski, A. & Oswald, M. (2009). GNSS/LPS/LS based Online Control and Alarm System (GOCA) - *Mathematical Models and Technical Realization of a Scalable System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Analysis*. In Proceedings of LTBD09 Symposium, Graz, October 2009.

Liberata Ullo, S., Addabbo, P., Di Martire, D., Sica, S., Fiscante, N., Cicala, L. & Angelino, C. V. (2019). Application of DInSAR Technique to High Coherence Sentinel-1 Images for Dam Monitoring and Result Validation Through *In Situ* Measurements. *IEEE Journal on selected topics in Earth Observation and Remote Sensing*, 12 (3), 875 – 890.

Lier, Ø.E; Cetinic, F; Ekström, I; Lauknes, T.R; Larsen, Y. (2015). *InSAR on Embankment dams. Pilot on deformation measurement. Energiforskrappport 2015:212*. Energiforsk.

Lin, C., Wu, G., Feng, X., Li, D., Yu, Z., Wang, X., Gao, Y., Guo, J., Wen, X. & Jian, W. (2021). Application of Multi-System Combination Precise Point Positioning in Landslide Monitoring. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8378.
<https://doi.org/10.3390/app11188378>

Lindner, G., Schraml, K., Mansberger, R. & Huebl, J. (2015). UAV monitoring and documentation of a large landslide. *Applied Geomatics*. DOI 10.1007/s12518-015-0165-0.

Measurand (2022a). *ShapeArray Principles*.
http://saascan.measurand.com/shapearray_principles

Measurand (2022b). *Using SAAScan*.
<http://saascan.measurand.com/using-saascan>

Othman, A.A.; Al- Maamar, A.F.; Al-Manmi, D.A.M.; Liesenberg, V.; Hasan, S.E.; Al-Saady, Y.I.; Shihab, A.T.; Khwedim, K. (2019). *Application of DInSAR-PSI Technology for Deformation Monitoring of the Mosul Dam*. *Iraq. Remote Sens.* 2019, 11, 2632. <https://doi.org/10.3390/rs11222632>

Ogundare, J. O. (2015). *Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice*. Wiley.

- Photonics. (2015). *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*.
https://www.photonics.com/images/Web/Webinars/80/Fiber_Optic_Sensors_Fundamentals_and_Applications.PDF
- Rau, J. Y., Jhan, J. P., and Andaru, R. (2006). *Landslide deformation monitoring by three-camera imaging system*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 559–565, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-559-2019>, 2019.
- SGF (Svenska Geotekniska Föreningen). (2006). *Metodbeskrivning för installation av inklinometerrör*. Linköping.
- Swepos (2022). Swepos Tjänsteportal. Hämtad den 2022-03-28 från <https://swepos.lantmateriet.se/>.
- Xu, H.; Li, H.; Yang, X.; Qi, S.; Zhou, J. (2018). *Integration of Terrestrial Laser Scanning and NURBS Modeling for the Deformation Monitoring of an Earth-Rock Dam*. *Sensors* 2019, 19, 22. <https://doi.org/10.3390/s19010022>
- Zschiesche, K. (2022). Image Assisted Total Stations for Structural Health Monitoring—A Review. *Geomatics* 2022, 2, 1–16.
<https://doi.org/10.3390/geomatics2010001>

MÄTMETODER FÖR RÖRELSEÖVER- VAKNING AV FYLLNINGSDAMMAR

Rörelser kan övervakas kontinuerligt hos fyllningsdammar för att exempelvis upptäcka inre erosion eller stabilitetsproblem hos dammen. De senaste åren har tekniken för rörelseövervakning gjort stora framsteg och intresset för mer heltäckande mätmetoder har ökat. I den här rapporten redovisas en aktuell sammanställning av tekniker som kan användas för rörelseövervakning av fyllningsdammar, både i dammen och på ytan av dammen. Rapporten beskriver läget i Sverige 2022, men ger även en mindre internationell utblick.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se