

Svenska Geotekniska Föreningen
Swedish Geotechnical Society

SGF Notat 1:2019

**Bildbaserad metod för mätning och över-
vakning av rörelser hos konstruktioner
vid geotekniska projekt**

Förstudie

Linköping 2019

Förord

Detta notat är resultatet av en förstudie om möjligheterna att använda bildbaserade metoder för att övervaka konstruktioner vid geotekniska projekt. I studien tas också upp frågan om lämpliga gränsvärden för tillåtna rörelser.

Förstudien har gjorts inom SGF Arbetsgrupp Risk. Författarna är Lars Olsson, Geostatistik AB och Bo Berggren, Berggren Tech AB.

Innehållsförteckning

Förord

1	<u>BAKGRUND</u>	<u>4</u>
1.1	Problemställningen	4
1.2	Förstudiens syfte	4
2	<u>RÖRELSER OCH DEFORMATIONER I BYGGNADER MED GEOTEKNISK ORSAK.....</u>	<u>5</u>
2.1	Orsaker.....	5
2.2	Skadekriterier för byggnader.....	5
2.3	Gränsvärden för rörelsedifferenser hos byggnader.....	6
2.3.1	Typer av gränsvärden.....	6
2.3.2	Förslag på gränsvärden	7
2.4	Exemplifierande beräkningar.....	8
2.5	Förbättrade kravformuleringar.....	9
3	<u>KONVENTIONELLA MÄTNINGAR AV RÖRELSERNA</u>	<u>11</u>
3.1	Metoder.....	11
3.1.1	Geodetisk mätning	11
3.1.2	Laserscanning	11
3.2	Utrustning och personal	11
3.3	Kostnads/ tidsaspekten.....	11
4	<u>BILDBASERADE METODER FÖR MÄTNING AV RÖRELSER.....</u>	<u>12</u>
4.1	Fotogrammetri	12
4.1.1	Klassisk fotogrammetri.....	12
4.1.2	Structure from Motion	12
4.2	Digital Image Correlation, DIC	13
4.3	Noggrannhet hos metoderna	13
4.4	Möjligheter mäta rörelser och deformationer vinkelrätt mot planet.....	15
4.5	Mätning av förändringar	15

5 BILDBASERADE METODER FÖR IDENTIFIERING OCH ANALYS AV SKADOR..... 16

5.1	Bildanalys allmänt	16
5.2	Indikatorer på skada.....	16
5.3	Sätt att identifiera skador	16
5.3.1	Ändringar i ytskikt	17
5.3.2	Lutningar.....	17
5.3.3	Sprickor.....	17
5.4	Identifiering av förändringar.....	17
5.5	Uppföljning av skadeutveckling	17

6 FÄLTUTRUSTNING FÖR BILDBASERAD MÄTNING 18

6.1	Kameror	18
6.1.1	Handhållen kamera	18
6.1.2	Fast monterade kamera	18
6.2	Drönare (UAV).....	18
6.3	Referenspunkter, markeringar	18

7 PROGRAMVARA FÖR UTVÄRDERING..... 19

7.1	Krav på datorer	19
7.2	Programvaror	19
7.3	Virtual reality.....	19

8 TILLÄMPNINGSSOMRÅDEN FÖR BILDBASERAD MÄTNING OCH ÖVERVAKNING..... 20

8.1	Mätning av deformationer och rörelser	20
8.1.1	Rörelser och deformationer i nuläget.....	20
8.1.2	Ändringar av rörelser	20
8.1.3	Korttidsförändringar av deformation och rörelse.....	22
8.2	Kontroll mot gränsvärden	22
8.2.1	Kontroll mot skadekriterier.....	22
8.2.2	Observationsmetoden.....	22
8.3	Dokumentation.....	22
8.3.1	Baseline (rådande förhållanden)	23

8.3.2	Skadedokumentation.....	23
8.4	Upptäcka förändringar	23
8.5	Upptäcka förändringar i beteende.....	23
9	<u>KOMMERSIELLA ASPEKTER.....</u>	25
9.1	Användningsområden	25
9.1.1	Besiktning före schakt etc.....	25
9.1.2	Övervakning under markarbeten.....	25
9.1.3	Kontroll av snabba rörelser.....	25
9.1.4	Observationsmetoden.....	25
9.2	Tänkbara användare	25
9.2.1	Myndigheter.....	25
9.2.2	Entreprenörer	25
9.2.3	Försäkringsbolag.....	26
9.2.4	Privatpersoner	26
9.3	Användning vid liknande tillämpningar	26
9.3.1	Structural health monitoring	26
9.3.2	Broinspektion.....	26
9.3.3	Tunnelinspektion	26
9.4	Pågående utvecklingsarbeten.....	26
10	<u>REFERENSER.....</u>	27

1

BAKGRUND

Det är inte sällan som frågor och diskussioner uppkommer vid sprickskador på byggnader, exempelvis: "Vad är orsaken till skadan? Kan den ha undvikits? Kan den ha prognosticerats? Vem är ansvarig?" Därför är det viktigt att utföra mätningar med rätt inriktning, utformning och precision så att dessa frågor kan besvaras i möjligaste mån. Sedan länge finns inom geobranchen en uppsättning av gränsvärden för rörelser och deformationer som om de överskrids orsakar sprickskador. Ett problem är emellertid att det inte finns tydliga rekommendationer hur mätningar ska genomföras. I Sverige finns dessutom inte tydliga rekommendationer eller regler för hur skador ska kategoriseras och klassificeras, vilket är ett måste för att förklara dialogen mellan olika parter i byggprocessen. I föreliggande förstudie beskriver vi olika metoder och föreslår fortsatta studier för att komma till rekommendationer om mätmetoder och deras genomförande för en bättre hantering av problematiken.

Ordet deformation har egentligen betydelsen formförändring medan rörelse avser en förflyttning. Vi tillåter oss dock att skriva "rörelser" i stället för "rörelser och eller deformationer" när det inte kan misstolkas.

1.1 Problemställningen

Det finns inom geotekniken ofta skäl att övervaka rörelser hos olika typer av konstruktioner som påverkas arbeten vid markprojekt så att onödiga kostnader undviks. I dag används ofta övervakningsmetoder som är tids- och kostnadskrävande, samtidigt som de är kopplade till skadekriterier som inte är helt optimala. Typiska rörelser som är aktuella i dessa sammanhang är sättningsskador på byggnader i närheten av markprojektet och rörelser hos olika stödkonstruktioner men de metoder som avses studeras kan användas generellt för att övervaka rörelse.

En annan aspekt på problemställningen är att upptäcka och övervaka synliga skador, kanske främst sprickor, som kan uppkomma vid mindre rörelser.

Till detta kan man lägga bilddokumentation av förhållandena innan den geotekniska åtgärden vidtogs, så att man har möjlighet att i efterhand konstatera eventuella förändringar, något som kan vara önskvärt när det gäller ansvarsfrågor.

1.2 Förstudiens syfte

SGF har genom Sektion Jord bekostat denna förstudie med syfte att ge ett underlag för ett väl utarbetat projektförslag gällande:

- Översyn av skadekriterier för differentialrörelser i byggnader
- Beskrivning av bildbaserade metoder lämpade för geo-tillämpningar, både för deformationsmätningar och för detektering och uppföljning av skador.
- Beskrivning av tillämpningsområden för metoderna

RÖRELSE OCH DEFORMATIONER I BYGGNADER MED GEOTEKNISK ORSAK

2.1 Orsaker

Ofta förekommer det att byggnader skadas vid arbeten som schaktning, pålning och spontslagning som utförs i närheten. Oftast är skadeorsaken differentialsättningar eller horisontalrörelser som orsakas av dessa arbeten, eller som orsakas av en grundläggning som inte bär lasten på ett tillfredsställande sätt, antingen på grund av felaktigt utförande eller på grund av en oförutsedd belastning eller deformation.

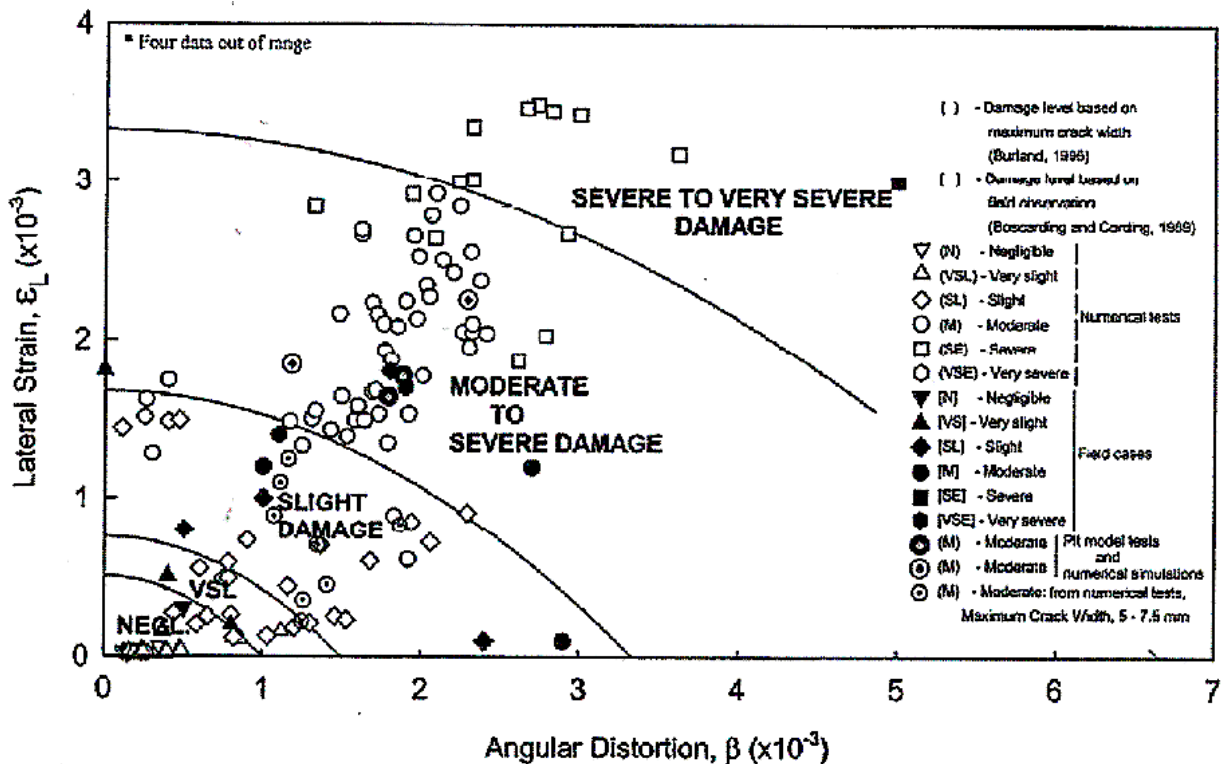
Men liknande skador kan uppkomma av andra orsaker, tunneldrivning i jord eller gruvsdrift som i Kiruna.

I samband med schakt kan man också få rörelser i temporära stödkonstruktioner, till exempel sponter. Det handlar då främst om utböjningar hos stödkonstruktionen. Dessa rörelser kan beövas övervakas med hänsyn till stödkonstruktionen, men också med hänsyn till möjliga rörelser och deformationer hos byggnadsverk i omgivningen.

2.2 Skadekriterier för byggnader.

Rörelser hos byggnader kan ge upphov till skador, rent utseendemässiga skador, sådana som påverkar användningen och skador som påverkar bärförmågan.

Karlsruud (2015) redovisar skadepotential för både rena sättningar och fall där det också förekommer en horisontalförskjutning.



Figur 1 Skadeklasser baserade på lateral töjning och vinkeländring. Ur Karlsruud (2015)

2.3 Gränsvärden för rörelsedifferenser hos byggnader

För att kunna göra bedömning av skador på byggnader har gränsvärden föreslagits för brytningsvinklar (eng. Angular Distortion) och för nedböjningskvot (eng. Deflection Ratio) enligt Figur 2.

Användningen av brytningsvinklar har föreslagits av Meyerhof (1953), Skempton och Mac-Donald (1956) och Bjerrum (1963) medan Polshin & Tokar (1957) har rekommenderat att man använder nedböjningskvot.

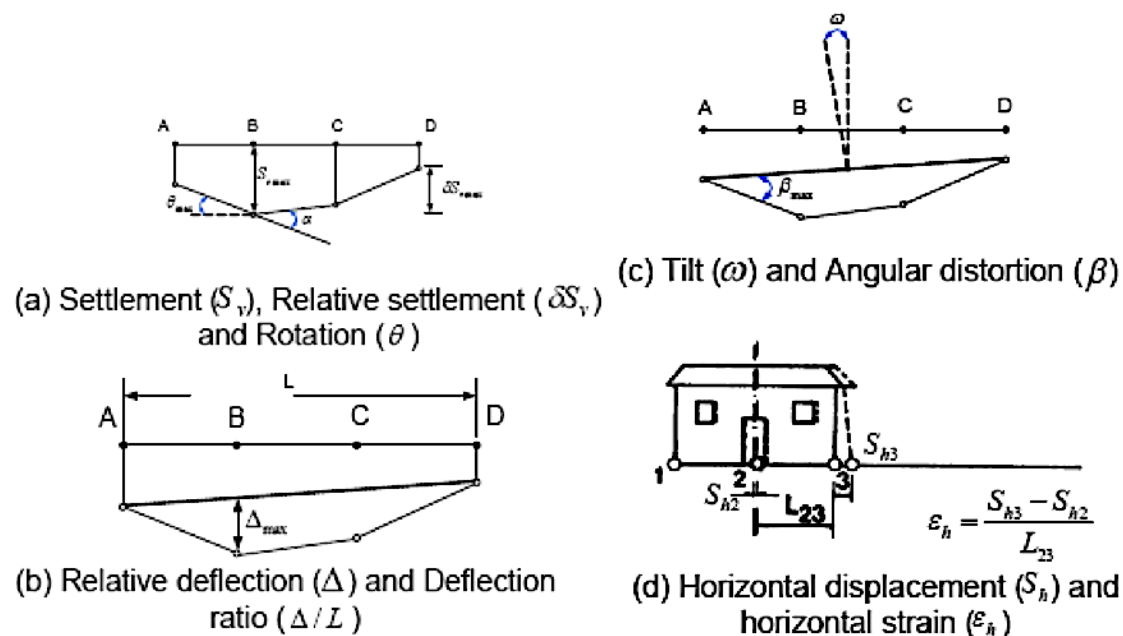
Wahls (1981) och Netzel (2004) redovisar olika sätt att definiera skadekriterierna där hänsyn tas också till dragspänningar.

För sannolikhetsbaserad dimensionering har Zhang & Ng (2007) presenterat en genomgång av data från byggnader med och utan skador, både arkitektoniska och strukturella, och givit förslag på tillåtna värden.

2.3.1 Typer av gränsvärden

I Figur 2 definieras olika mått som kan användas som gränsvärden:

- Sättning, differentialsättning och rotation
- Relativ nedböjning och nedböjningskvot Δ/L
- Lutning ω och brytningsvinkel β
- Horisontell förskjutning och horisontell töjning



Figur 2 Mått som kan användas för gränsvärden. Ur Koff (2009)

2.3.2 Förslag på gränsvärden

I Tabell 1 ges värden rekommenderade av Bjerrum, (1963).

Tabell 1 Värden på brytningsvinkel enligt Bjerrum (1963)

Category of potential damage	β_{\max}
Safe limit for flexible brick wall ($L/H > 4$)	1/150
Danger of structural damage to most buildings	1/150
Cracking of panel and brick walls	1/150
Visible tilting of high rigid buildings	1/250
First cracking of panel walls	1/300
Safe limit for no cracking of building	1/500
Danger to frame with diagonal	1/600

I Eurokod (2005) (SS-EN1997-1:2005) anges följande i Bilaga H (informativ):

”Gränsvärden för bärverksdeformationer och fundamentrörelse

(1) De komponenter av fundamentrörelser som bör beaktas omfattar sättning, relativ (eller differentiell) sättning, vinkeländring, lutningsändring, relativ krökning, relativ rotation, horisontalförskjutning och vibrationsamplitud. Definitioner av några termer för fundamentrörelser och deformation ges i Figur H.1.

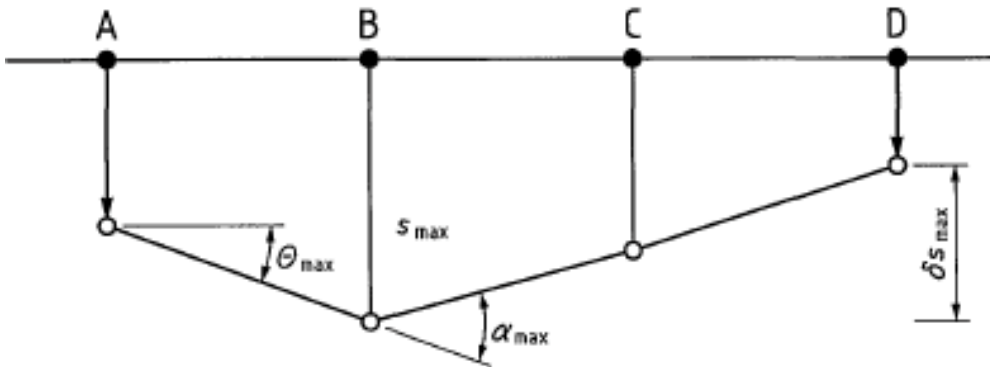
(2) De maximalt godtagbara relativa rotationerna hos öppna ramverk, fyllda ramar och lastbärande eller kontinuerliga tegelväggar är knappast desamma men ligger sannolikt inom gränserna 1/2000 till ungefär 1/300 för att förhindra uppkomst av ett bruksgränstillstånd i bärverket. En maximal vinkeländring av 1/500 är godtagbar för många bärverk. Den vinkeländring som troligtvis ger upphov till ett brottgränstillstånd är ungefär 1/150.

(3) De förhållanden som ges i (2) avser en nedsjunkning av den typ som visas i Figur H.1. I ett fall där kantsättningen är större än midsättningen bör värdena halveras.

(4) För normala bärverk med separata grundsulor är totala sättningar av upp till 50 mm ofta godtagbara. Större sättningar kan accepteras förutsatt att vinkeländringarna håller sig inom godtagbara gränser och att de totala sättningarna inte orsakar problem med ledningar som ansluter till bärverket, eller ger upphov till lutning, etc.

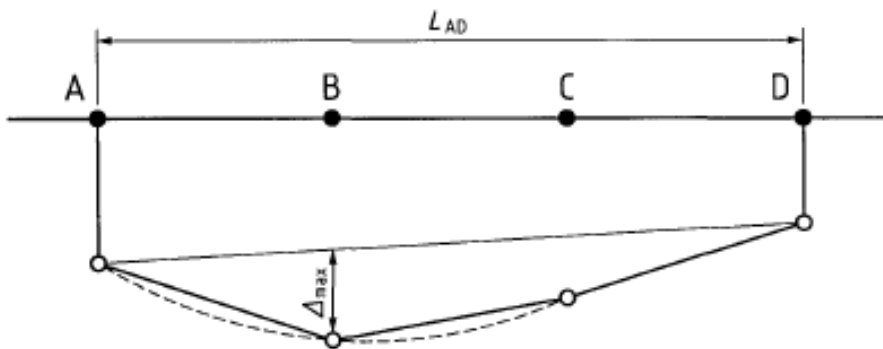
(5) Dessa riktlinjer rörande gränsvärden för sättningar gäller för normala, ordinära bärverk. De bör inte tillämpas på byggnader eller konstruktioner, som ligger utanför det vanliga eller för vilka lastintensiteten är markant olikformig.”

Figur H.1 ur Eurokod återges nedan i Figur 3

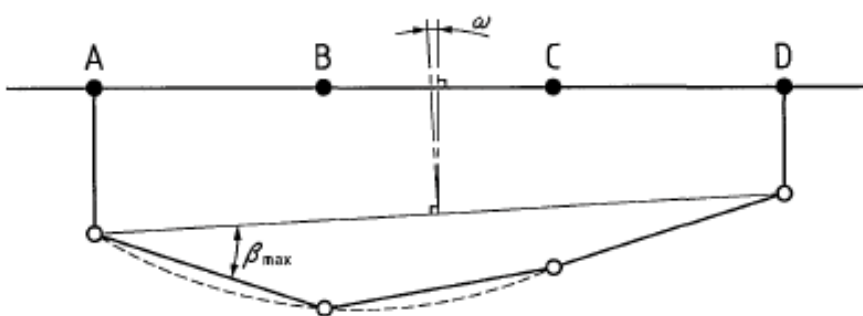


definitioner av sättning s , sättningsdifferens δs , rotation Θ och vinkeländring α .

Anmärkning om vinkeln α . I Eurokod används vinkeländring för det vi på andra ställen i rapporten kallar brytningsvinkel.



definitioner av differentialsättning Δ och sättningskvot Δ/L



definitioner av lutningsändring ω och relativ rotation (vinkeländring) β .

Figur 3 Definition av fundamentrörelser (Figur 4.1 i Eurokod.)

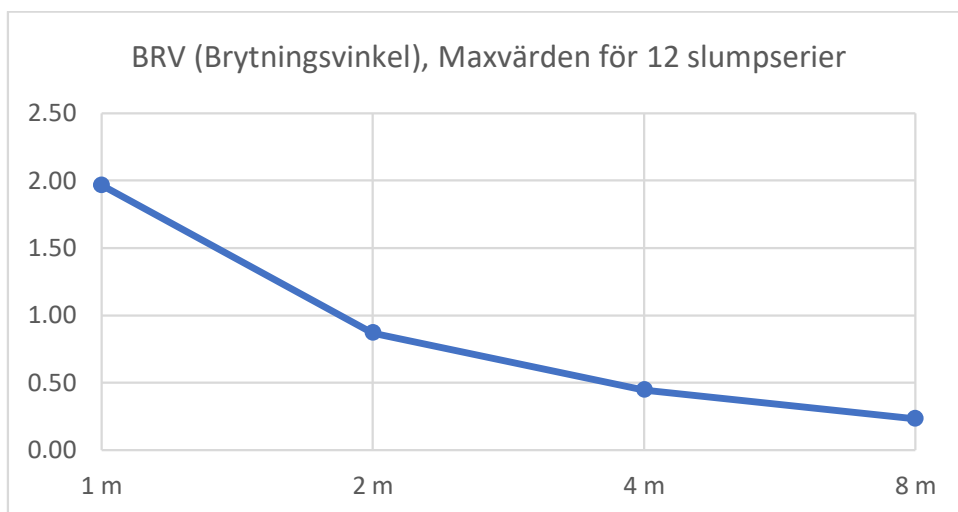
2.4 Exemplifierande beräkningar

En byggnad utsätts för olika laster och påtvingade rörelser, såväl i vertikalled som i horisontalled. När rörelserna blir för stora hotas byggnadens funktion och säkerhet. Man koncentrerar ofta mätningarna att omfatta endast vertikala rörelser eftersom mätning av horisontella

rörelser är svåra att genomföra och därför ofta förbises. Men även om bara vertikala rörelser mäts upp måste man ifrågasätta värdet av dessa eftersom man ofta väljer ett fåtal mätpunkter, inte sällan med upp till 10-tals meter mellan mätpunkterna. Exemplet är valt så att det ger en tydlig bild av vad som händer när antalet mätpunkter minskar. För att undersöka effekten av hur mätavstånd och antal mätpunkter påverkar resultatet av rörelsemätningar har en enkel beräkning av den s.k. brytningsvinkeln gjorts med utgångspunkt från en byggnads antagna slumpmässiga rörelse i 35 punkter med avstånd av 1 m mellan mätpunkterna. Nivån för de 35 punkterna varierades slumpmässigt mellan nivån +9,00 och +10,00. Därefter har varannan mätpunkt tagits bort i tre steg så att antalet mätpunkter i det sista steget är fem (5) med ett inbördes avstånd av 8 m. Resultatet visas i Figur 4.

För olika avstånd mellan mätpunkterna blir den största dimensionslösa brytningsvinkeln 1,97, 0,87, 0,45 och 0,23 för $L=1, 2, 4$ resp. 8 m. Beräknad brytningsvinkel minskar alltså kraftigt med större avstånd och färre mätpunkter. Slutsatsen är att om mätning av mätpunkter ska göras bör man sätta upp ett mätprogram med så många mätpunkter som möjligt. Detta kan naturligtvis innebära svårigheter, bl.a. att kostnaden att genomföra programmet blir stor.

I beräkningsexemplet gäller att brytningsvinkeln är vinkeldifferensen vid resp. punkt, vilket skiljer sig från Bjerrums definition.

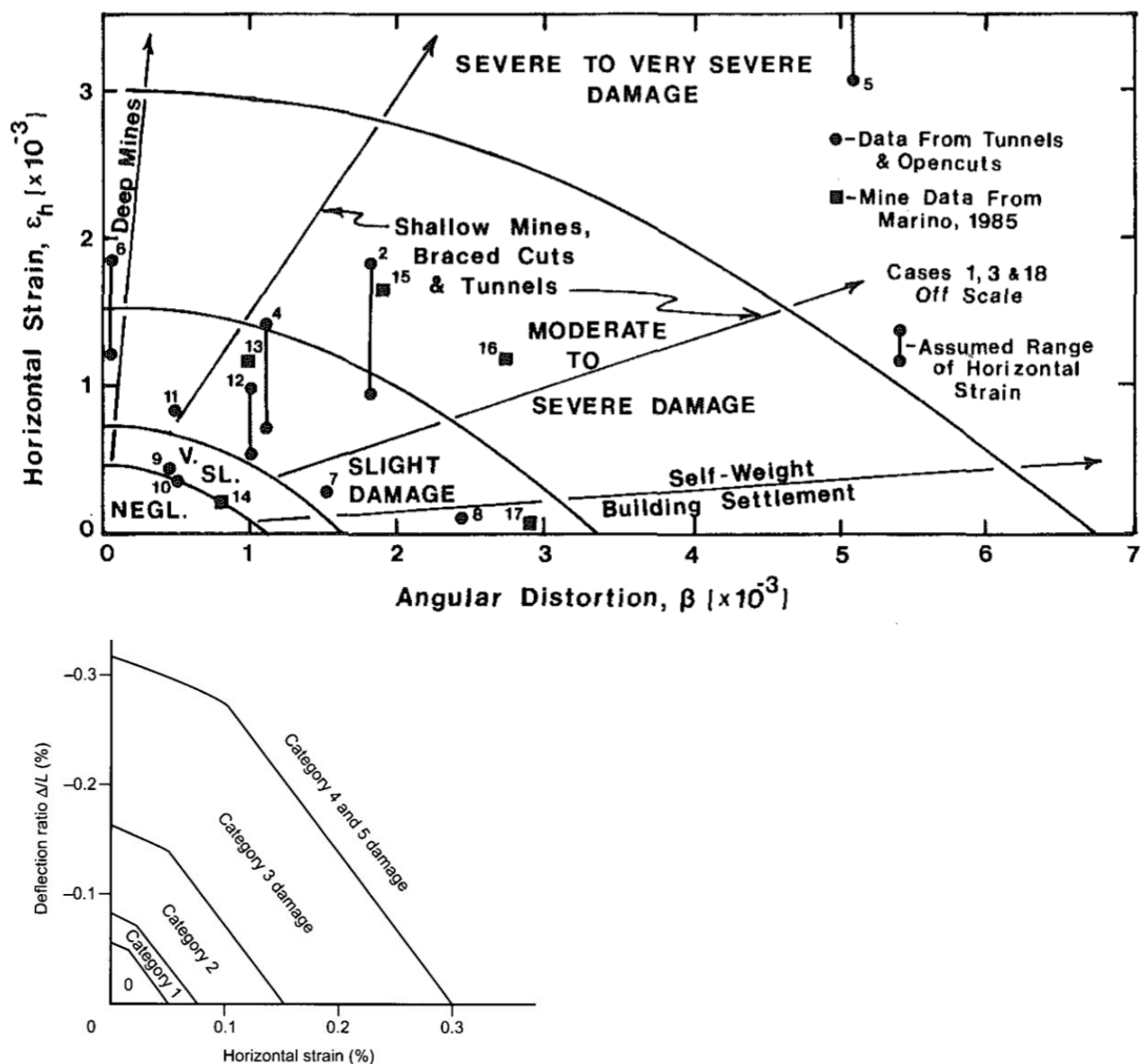


Figur 4 Brytningsvinklar för olika avstånd mellan mätpunkter

2.5 Förbättrade kravformuleringar

Det finns förmodligen bättre kriterier, men den mätteknik som används bromsar deras användning. Accepterade kritiska värden på brytningsvinklar för olika byggnadsstommar har framkommit genom analys av manuella mätningar och frågan är om dessa kritiska värden behöver justeras med hänsyn till mätningens noggrannhet.

I andra, nyare kriterier tar man även med horisontell deformation:



Figur 5 Kriterier med bl.a. horisontell deformation, Netzel (2004)

Med bildbaserad mätning skulle man kunna använda kriterier som är bättre. Ett förslag ges av Roy E. Olson (1989): *Note that a better measure of distortion would be curvature but field evidence does not lend itself to the calculation of radii of curvature so we will select this simple parameter* (d.v.s. lutning mellan två punkter).

Sådana kriterier behöver viss utveckling, både vad gäller kriterierna och mätmetodiken. En sådan utveckling bör ligga inom ramen för ett framtida projekt.

3 **KONVENTIONELLA MÄTNINGAR AV RÖRELSERNA**

3.1 Metoder

För mätning av rörelser över såväl vertikala som horisontella sträckor används idag inom geotekniken oftast manuella system.

Det finns ett antal metoder, se t.ex. USACE (2002)

3.1.1 Geodetisk mätning

När det gäller mätning av vertikala rörelser hos en byggnad används ofta inmätning av dubbar applicerade på byggnadens fasader. För inmätning av horisontella och vertikala rörelser används allt oftare inmätning av prismor från en mätstation.

Nackdelen med dessa metoder är dels att de är dyrbara och kräver särskild personal, men också, och kanske viktigare, att man bara får värden från de punkter man valt från början. Om de visar sig vara suboptimala kan mätningens värde bli begränsat.

Det skulle behövas en metod som mäter ett stort antal punkter, så att man ser hela deformationsmönstret och kan anpassa utvärderingen efter farligaste områden.

3.1.2 Laserscanning

Vid laserscanning mäts avståndet mellan lasern och punkter på föremålet och man får en bild som visar avståndet och som sedan kan behandlas. Till skillnad från bildbaserade mätmetoder får man ingen bild av texturer etc. hos föremålet utan sådana uppgifter måste läggas på från fotografiska bilder.

3.2 Utrustning och personal

Konventionell inmätning kräver normalt utrustning av typ totalstation med prismor etc., möjligen kan en automatisk totalstation användas och mätning göras mot punkter som inte är signalerade.

Laserscanning kräver en laserscanner. Sådana är fortfarande dyra, även om utvecklingen går snabbt framåt, bland annat eftersom laserscanner används vid kartering av stadsmiljöer, till självkörande bilar o.s.v.

3.3 Kostnads/ tidsaspekten

Alla de konventionella metoderna kräver speciell personal i fält och för utvärderingen.

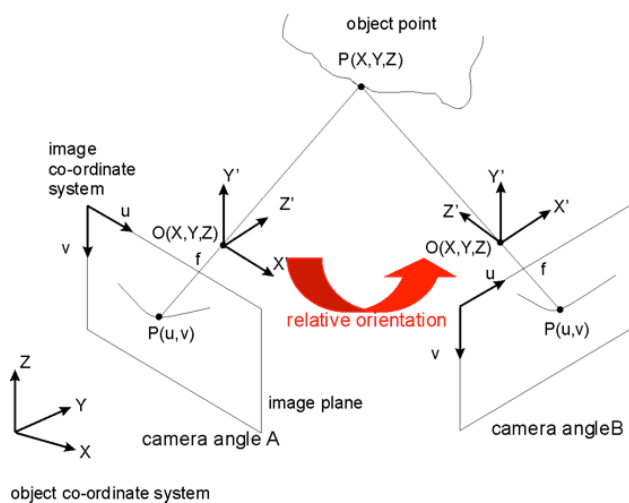
De kräver också stabila instrumentuppställningar, som även om de inte är permanenta, kan vara hindrande för annan verksamhet på platsen.

4.1 Fotogrammetri

När man använder fotogrammetriska metoder bestämmer man läget av valda punkter i ett lämpligt koordinatsystem. Om man bestämmer läget av ett stort antal punkter kan man skapa en modell av en struktur.

4.1.1 Klassisk fotogrammetri

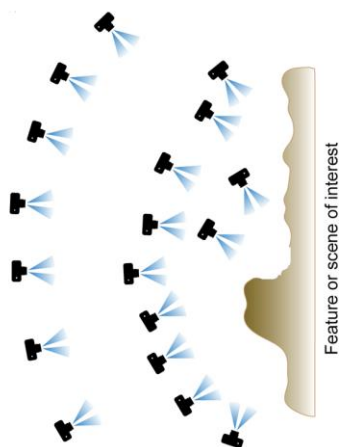
Vid den klassiska fotogrammetrin använder man mätkameror med kända egenskaper, yttre och inre orientering.



Figur 6 Geometrin vid stereofoto. Ur Gaich et al 2006

4.1.2 Structure from Motion

När man använder den metod som kallas Structure from Motion (SfM) använder man inte parallella kameror, men man skaffar sig ett stort antal överlappande bilder, se Figur 7.



Figur 7 Överlappande bilder vid SfM. Ur Micheletti m.fl (2015) .

Man bestämmer kamerornas egenskaper, läge och orientering ur bilderna genom vad som kallas bundle adjustment. Sedan kan man skapa en modell, i form av ett tätt punktmoln.

Det finns inte ens ett krav att använda samma kamera eller ens att bilderna är tagna vid samma tidpunkt, något som utnyttjas vid så kallad Phototourism, se Snavely et al (2006). Där kan vissa bilder som används vid modellbygget vara hämtade från Internet, Goesele et al (2007).

4.2 Digital Image Correlation, DIC

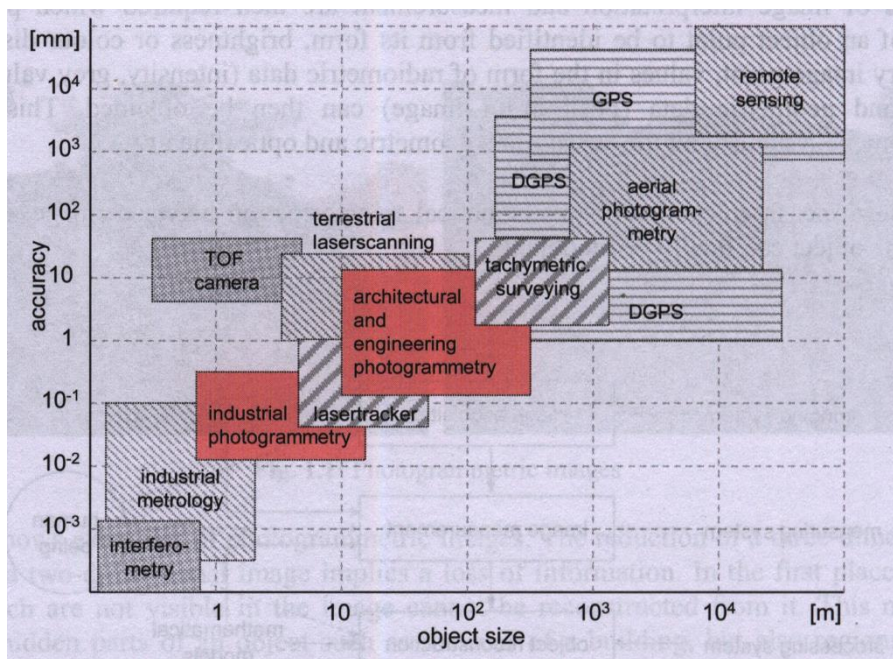
DIC skiljer sig från de fotogrammetriska metoderna genom att man inte skapar en modell utan i stället arbetar med att jämföra bilder och mäta förändringar mellan bilderna. Namnet kommer sig av att man använder statistisk korrelation för att identifiera element i bilderna. Metoden kräver att man tar bilderna med samma kamerauppställning (eventuellt bestämd med geodetiska metoder) eller att man har orienteringselement monterade på den avbildade strukturen. Metodik för att använda metoden när man har identifierbara element i de två bilderna finns beskriven i Malesa & Kujawinska (2012, 2013).

Ett alternativ, 3D Digital Image Correlation, arbetar med kamerapar som är inbördes fast monterade och där man kan ha fri uppställning av kameraparet. En tillämpning av metoden på rörelser i sprutbetong med kommentarer om olika aspekter finns i Sjölander, (2019).

4.3 Noggrannhet hos metoderna

Den noggrannhet man kan uppnå beror av ett antal faktorer. Det är därför svårt att ge entydiga siffror, men man kan konstatera att rätt använd har man en noggrannhet som är minst i klass med manuella mätningar.

Olika metoder har olika noggrannhet och lämpar sig för olika stora objekt. En översikt över noggrannheten vid fjärrmetoder hämtad ur Luhmann m.fl (2014) visas i Figur 8



Figur 8 Noggrannhet vid olika fjärrinspektionsmetoder. Luhmann et al (2014)

För fotogrammetri anger Photomodeler Technologies de noggrannheter som visas i Figur 9

	Camera Resolution	Camera Calibration Method	Point Angles +	Photo Orientation Quality	Photo Redundancy	Targets
Lowest Accuracy 1 part in 100	Low (eg Video) 640x480	No calibration ↓ Inverse Camera	15 degrees or less	Few points per photo, low point coverage	Points mostly on only 2 photos	No circular targets, all user marked points
Average Accuracy 1 part in 5,000	Medium (eg basic/older digital camera) 8MP 3264x2468	PhotoModeler Camera Calibrator (good solution)	20-90 degrees	15+ points per photo, up to 60% coverage	Most points on 3 or more photos	Some points marked on naturally lit targets at key locations
Highest Accuracy 1 part in 30,000+	High (eg good quality digital camera) 20MP+ 5400x3600 or higher	Field Calibration	Close to 90 degrees	35+ points per photo, up to 60% coverage	Most points on 8 or more photos	Many points marked on standard target points All points marked on well-defined targets

Figur 9 Noggrannhet vid fotogrammetri vid olika förhållanden

Frågan bör utredas vidare i huvudprojektet och anvisningar tas fram för olika metoder och tillämpningar.

4.4 Möjligheter mäta rörelser och deformationer vinkelrätt mot planet

Om man vill mäta deformationer som är vinkelräta mot planet, t.ex. utböjningar, kan man använda antingen fotogrammetriska metoder och skapa en 3D-modell, eller också använda 3D DIC. Om man vill mäta rörelser vinkelrätt mot planet krävs referenspunkter som inte rör sig.

4.5 Mätning av förändringar

Rörelseförändringar med tiden kan mätas genom att man tittar på skillnaden mellan två fotogrammetriska modeller eller genom att man använder DIC. I det senare fallet måste man tänka på kravet att ha en fast kamera eller fasta orienteringselement, Sjölander (2019).

För korttidsförändringar är DIC lämpligt, eftersom man då kan mäta även vid dynamiska förlopp. En utrustning som används för maskinövervakning med som även kan användas vid byggnader är Iris-M, Eriksson (2019).

5 BILDBASERADE METODER FÖR IDENTIFIERING OCH ANALYS AV SKADOR

5.1 Bildanalys allmänt

En manuell besiktning i fält är inte felfri utan det finns en del felkällor, See (2012). Det finns därför skäl att utnyttja bildbaserade metoder även vid inspektion, bland annat därför att man får en objektiv dokumentation.

Man skall i detta sammanhang inte glömma möjligheten att använda äldre bilder, jämför Avsnitt 4.1.2

5.2 Indikatorer på skada

De skador som kan upptäckas är främst sprickor som kan uppträda i fasader. Karlsrud (2015) ger exempel på var sprickor kan uppträda vid olika sättningformer, se Figur 10.



Figur 10 Sprickor vid olika sättningsformer. Ur Karlsrud (2015)

Anmärkning: övre högra figuren: Vid hogging uppkommer oftast diagonala sprickmönster som pekar uppåt/utåt i figuren

5.3 Sätt att identifiera skador

Skador kan vara av olika svårighetsgrad, från kosmetiska, via bruksgränshotande till brottgränshotande. Vid användning av bildbaserade metoder är det främst tre indikatorer på skador som man kan titta efter:

- Ändringar i ytskikt
- Lutningar
- Sprickor

5.3.1 Ändringar i ytskikt

Ändringar som kan vara aktuella att titta efter är t.ex. nerfall av puts, färgändringar och fuktfläckar. Vissa sådana ändringar kan vara svåra att se med synligt ljus och man behöver i stället infrarött ljus.

5.3.2 Lutningar

Lutningar kan upptäckas och mätas i bilder, men det krävs någon referenslinje, horisontell eller vertikal. Ett känt knep är att anta att till synes horisontella fönsterlinjer eller andra fasadlinjer ursprungligen har varit i ett exakt horisontalplan.

5.3.3 Sprickor

En mycket vanlig skadeindikator är sprickor, särskilt som sprickan själv kan vara en skada. Mycket forskning om automatisk detektering av sprickor finns publicerad och metodiken verkar mogen. Se till exempel Valença et al (2013) och Nishiyama et al (2015). Man ska emellertid vara uppmärksam på att krympning av material kan förekomma i horisontell riktning.

5.4 Identifiering av förändringar

En förändring behöver inte nödvändigtvis betyda att en skada uppkommit, men kan vara ett varningstecken. Att upptäcka om det skett en förändring mellan två tidpunkter, där bilder tagits, kan göras manuellt, men en intressant möjlighet är att använda automatisk identifiering av förändringar och sedan göra en manuell analys, McCormick & Lord (2011).

5.5 Uppföljning av skadeutveckling

Ändringar i ytskikt och ändringar i lutning måste nog följas upp genom manuell analys.

För uppföljning av sprickor finns automatiska system beskrivna i litteraturen. Viss uppföljning och redovisning bör göras i huvudprojektet.

6.1 Kameror

Med modern analytisk fotogrammetri (Structure from Motion) krävs inte några speciella mätkameror utan en amatorkamera av hyfsad klass är tillräcklig. Kraven varierar naturligtvis med hur små detaljer man vill kunna se (sprickor) och man vill ha en hög upplösning (små ”pixlar på marken”). Eventuell felteckning hos kameralinsen korrigeras genom att den kalibreras och kalibreringsdata används för att justera bilderna. Detta gör det möjligt att också använda äldre (amatör)bilder för att se förändringar, se Snavely et al (2006).

6.1.1 Handhållen kamera

Kameran bör vara av god kvalitet, men en särskild mätkamera är inte nödvändig. En sak att tänka på är att autofokus skall kunna kopplas ur, så att bilderna tas med samma inställning.

Man kan ibland använda en stångmonterad handhållen kamera för att komma tillräckligt högt, se t.ex. Shervais (2015).

6.1.2 Fast monterade kamera

Vid användning av DIC måste man ha en fast kameraposition, antingen genom att man lämnar kameran på plats eller genom att man har en anordning så att kameran kan återmonteras på samma plats, Sjölander (2019).

6.2 Drönare (UAV)

Ett sätt att göra åtkomsten till platsen enklare är att använda drönare (UAV). Det har gjorts både med fotogrammetriska metoder (SfM) och med 3D DIC. Se t.ex. Hallermann et al (2014), Carnevali et al (2018) och Gillins et al (2018). Drönare kan också vara autonoma, se t.ex. Ny Teknik 2019.

6.3 Referenspunkter, markeringar

För att man skall kunna följa rörelseförändringar måste man kunna ta bilder eller följa sammansatta modeller från olika tillfällen och passa ihop dem (eng. registrering). Det krävs därvid att man har igenkännbara punkter i båda bilderna. Man kan då passa ihop bilderna i ett lokalt koordinatsystem.

Ofta kan detta göras med strukturer som finns naturligt och det kan göras av programvaran, eventuellt med manuellt utpekade punkter. Det kan ändå vara en fördel med att ha särskilda markeringar som är tydligt definierade och eventuellt inmätta i ett lämpligt koordinatsystem.

En variant är att hänga upp lod med markeringar med känt inbördes avstånd, vilket definierar vertikallinjen och ger skalan eller projicerade referenspunkter, Gaich et al (2012).

En tillämpning där man använder vertikala stänger som referenser när man gör en fotogrammetrisk avvägning för att få ett snabbare arbete, t.ex. i en tunnel, finns i Barazetti et al (2014).

När det gäller 2D DIC behövs fixa referenspunkter i ett plan, antingen naturliga (identifierbara och inmätta) eller speciella som monterats.

7 PROGRAMVARA FÖR UTVÄRDERING

Det finns ett antal olika programvaror för bildbehandling och modellering. Två huvudgrupper kan urskiljas ur en ekonomisk aspekt, öppna program (open source) och kommersiella. Ofta har de samma funktioner, men gratisprogrammen kräver mer av användaren än vad de kommersiella gör, medan priset kan vara högt för de sistnämnda.

Förmodligen finns det behov av bägge typerna, kommersiella för sådana som själva har stor utnyttjandegrad eller som säljer tjänsten och gratisprogram för mindre frekventa användare.

7.1 Krav på datorer

Ofta ställs höga och stora krav på de datorer som skall användas för att man skall få rimliga beräkningstider.

Påpekas bör att vissa programvaror har möjlighet till molnbaserad behandling, så att den egna datorkapaciteten blir mindre avgörande.

7.2 Programvaror

Redogörelser för några olika programvaror finns i t.ex. i de la Torre García (2013), Bartoš et al (2014).

Programvaror som finns omnämnda i olika litteratur omfattar till exempel:

- Autodesk ImageModeler
- Microsoft Pix (tidigare Photosynth)
- Bundler
- Agisoft Metashape
- PhotoModeler
- VisualSFM: A Visual Structure from Motion System
- MicMac (Rupnik et al 2017)
- Py2DIC (Ravanellei et al 2017)
- ShapeMetrix
- Meshlab

Denna lista är långt ifrån fullständig. En ytterligare genomgång av programvaror, recensioner och ev. egna tester bör vara en del av huvudprojektet, bland annat eftersom utvecklingen är snabb.

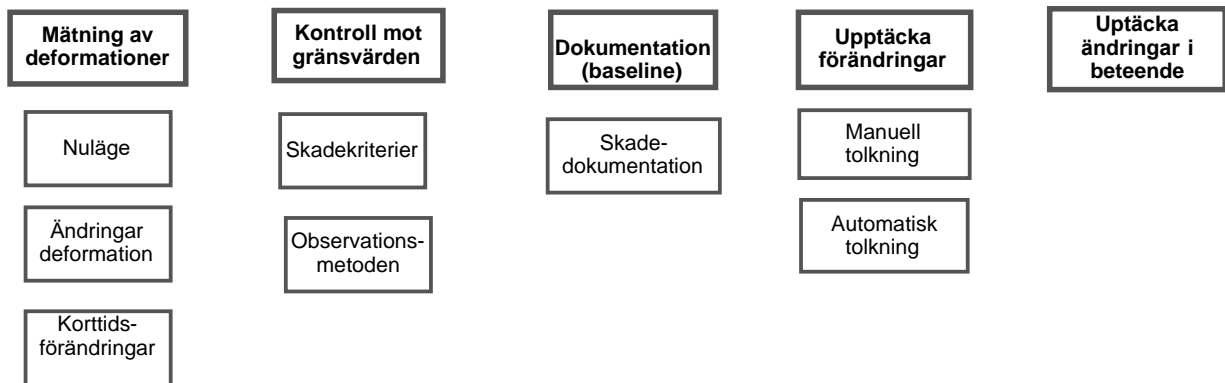
7.3 Virtual reality

Även om det inte bara är en programvara bör VR (virtual reality) nämnas, eftersom det tillsammans med AR (augmented reality) kan få tillämpningar inom området, bland annat som hjälp vid manuell inspektion. Se t. ex Wallgrün et al (2016).

8 TILLÄMPNINGSSOMRÅDEN FÖR BILDBASERAD MÄTNING OCH ÖVERVAKNING

Det finns ett antal områden där bildbaserad mätning kan användas för övervakning och kontroll i geotekniska sammanhang. Här inriktar vi oss främst på byggnadsverk, men vi vill framhålla att metoderna i sig är mycket väl lämpade för till exempel slänter i jord och berg, bergskärningar etc. se t.ex. Tannant (2015).

Några av de viktigaste tillämpningsområdena visas i Figur 11.



Figur 11 Användningsområden för bildbaserade metoder vid geokonstruktioner

8.1 Mätning av deformationer och rörelser

De bildbaserade metoderna som redskap för rörelsemätning har behandlats i Kapitel 4.

De är fotogrammetriska metoder och DIC (Digital Image Correlation).

8.1.1 Rörelser och deformationer i nuläget

En kartläggning av hur stora rörelserna är i nuläget hos en geokonstruktion (inklusive slänter etc.) görs genom att man skapar en digital modell med fotogrammetriska metoder. Ett exempel på användning av klassisk fotogrammetri ges i Massarsch (1976).

Man bör komma ihåg den möjlighet som modern metodik (SfM) ger att använda bilder från olika kameror när man gör modellen (Phototourism).

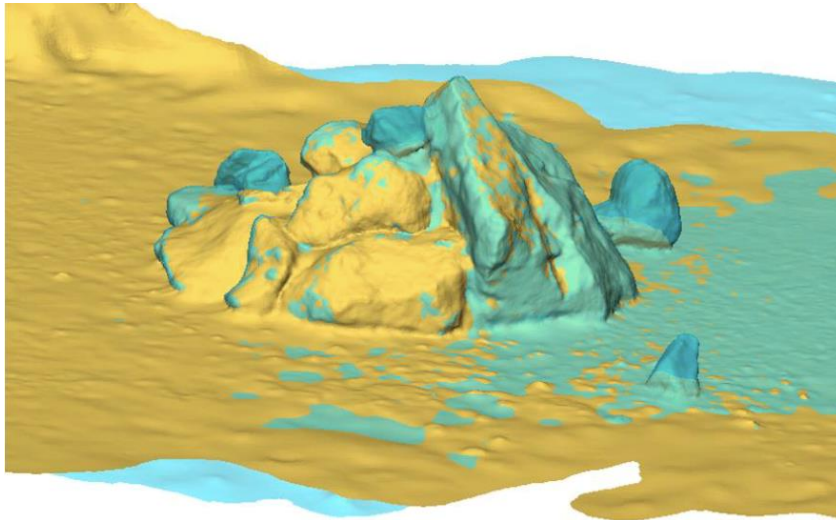
Användning av drönare gör att man snabbt kan ta bilderna som krävs även för ett större objekt.

8.1.2 Ändringar av rörelser

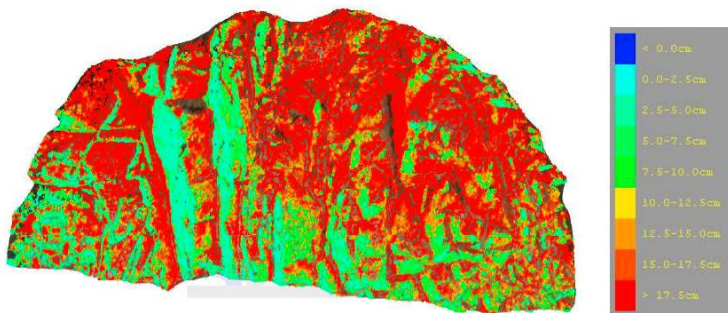
Ändringar kan mätas om man skapar två fotogrammetriska modeller och passar ihop dem (engelska registrering) och beräknar skillnaden. Modellerna kan skapas med olika kameror och kameraplaceringar vid de två tillfällena vilket gör den fotogrammetriska metoden smidig att använda. Ett problem ligger i hoppassningen av modellerna, men den kan ofta göras automatiskt.

Ett exempel på två modeller som passats ihop visas i Figur 12. Modellerna kommer från ett laboratorieförsök med mätning av nerfall (BeFo projekt 357). Modellerna har gjorts av 3GSM i Österrike med programvaran ShapeMetrix.

Ett annat exempel på användning av fotogrammetriska metoder på denna typ av problem är mätning av sprutbetongens tjocklek i en tunnel, som gjorts av Golder, genom att man jämfört en fotogrammetrisk modell före betongsprutningen med en efter sprutningen. Skillnaden blir då sprutbetongens tjocklek, Hermanson (2019). Ett exempel på redovisning av sprutbetong-tjocklek visas i Figur 13.



Figur 12 Två hoppassade modeller av bergnerfall, före och efter tillagda bitar



Figur 13 Redovisning av tjocklek hos sprutbetong (Pötsch, 2019)

Ett annat sätt att mäta lägesförändringar är att använda DIC, se Avsnitt 4.2. En nackdel är att metoden kräver fast kamerapunkt eller speciell kamera för 3D.

8.1.3 Korttidsförändringar av deformation och rörelse

I vissa fall vill man undersöka om en konstruktion påverkas av en belastning som påförs. Detta har använts vid kontroll av broar genom att man mäter rörelser när ett fordon passerar, och vid kontroll av spår och ballast genom att mäta under ett tåg vid passage.

Den metod som främst används är 2D och 3D Digital Image Correlation, som kan användas vid snabba förlopp, även vid vibrationer.

Man kan alltså tänka sig applikationer med mätning på något som vibrerar eller som belastas med stötar, t.ex. vid mätning vid jordpackning (man ser rörelser i ett större område) eller möjligen vid kontroll av stoppslagning av pålar.

8.2 Kontroll mot gränsvärden

Många geokonstruktioner, t.ex. sponter, rör sig normalt under uppförandet och användningen. Eftersom designen kan vara förknippad med osäkerheter kan övervakning behövas.

Detta kan gälla kontroll av att uppsatta gränsvärden för skadekriterier inte överskrids eller att man tillämpar observationsmetoden. Idag görs sådana övervakningar med olika sorters geodetiska mätningar, eller med speciella system t.ex. inklinometer.

En bildbaserad metod har fördelen att den ger en bild av rörelser i hela konstruktionen, så att man kan få en överblick av rörelsemönstret, inte bara rörelsen i på förhand utvalda punkter.

8.2.1 Kontroll mot skadekriterier

Skadekriterier för byggnader har behandlats i Kapitel 2. Andra skadekriterier eller gränsvärden ställs upp projektspecifikt. I Eurokod (SS-EN 1997-1:2005) anges under punkt 4.5 Uppföljning:

(9) I Geoteknisk Kategori 2 kan utvärderingen av beteendet baseras på rörelsemätningar i utvalda punkter i konstruktionen.

(10) I Geoteknisk Kategori 3 bör utvärderingen av beteendet normalt baseras på mätning av förskjutningar och på analyser som tar hänsyn till arbetsordningen.

8.2.2 Observationsmetoden

Ett särskilt fall för övervakning är när man tillämpar observationsmetoden. Man kan ta bilder vid upprepade tillfällen vid successivt utförande av arbetet, t.ex. spontning, schaktning, pålning, och se hur rörelser utvecklas med arbetets fortskridande och få en varning om en larmgräns är på väg att överskridas eller om rörelsemönstret avviker från det förväntade. Bildbaserade metoder kan därför vara mycket användbara när man tillämpar observationsmetoden.

Man kan för sådan övervakning också tänka sig automatiserade system, möjligen med tillämpning av AI för klassificering.

8.3 Dokumentation

Ett användningsområde där bildbaserade metoder är mycket lämpliga är när det gäller att dokumentera rådande förhållanden och inträffade förändringar,

8.3.1 Baseline (rådande förhållanden)

En viktig aspekt vid inspektion före och efter en geoteknisk åtgärd är att dokumentera rådande tillstånd på ett sätt som är tillförlitligt och objektivt. Här har bildbaserade metoder den fördelen att de registrerar allt synligt. Man har också möjligheten att använda fotografering med infrarött ljus för att se fukt. Dokumentation med fotografering påverkas inte av subjektiva faktorer som kan rikta inspektionen enbart mot vissa tänkta skador, så att andra som redan finns blir upptäckta till senare.

Det krävs dock en teknik vid fotograferingen så att bilderna passar till framtida analys, att den dokumenteras och att den ”arkiveras” så att den inte kan manipuleras.

8.3.2 Skadedokumentation

Om skador har inträffat kan bildbaserade metoder vara till stor hjälp, eftersom de snabbt täcker ett stort område och kan användas för mätningar av skadans storlek.

8.4 Upptäcka förändringar

En stor del av arbetet med att upptäcka förändringar kommer troligen även i fortsättningen att göras manuellt, även om stöd genom bildbehandling av detta arbete gör det snabbare och minskar sannolikheten för missar.

McCormick & Lord (2011) ger ett exempel på användning av DIC för att hitta förändringar på en pir. McCormick et al (2014) och McCormick, Jonas & Lane (2014) beskriver användning av 2D DIC för tunnelinspektion.

8.5 Upptäcka förändringar i beteende

När det gäller övervakning, till exempel i samband med observationsmetoden och även annars, är det värt att påpeka att utvecklingen inom Artificiell Intelligens, AI, och ”machine learning” går snabbt och att det snart torde bli möjligt att låta ett program larma om ett rörelsemönster ändras på ett farligt sätt.

Användningen av sådana metoder i olika sammanhang går framåt med stormsteg, och tillämpas även inom geotekniken. Ett svenskt exempel är Abbas (2018), som tillämpar metoden för att identifiera skredriskområden och i ett BeFo-projekt under uppstart avses metoden appliceras på bergytebestämning. Stentoumis et al (2016) redovisar användning av neurala nät för sprickidentifiering.

I vårt fall gäller det att den algoritm som används på ett dynamiskt sätt kan se förändringar som avviker, t.ex. en snabbare ökning i rörelsehastighet eller rörelser som uppträder på något nytt ställe.

Det finns ett antal olika algoritmtyper som används inom AI:

- Neurala nät
- Kunskapsbaserade system
- Bayesianska nät
- Stödvektor maskiner (support vector machine)
- CART

I dag tycks neurala nät vara det som har störst användning, men man kan för olika tillämpningar när det gäller bildbaserad övervakning också tänka sig stödvektormaskiner för klassificering och tillämpningar baserade på bayesianska principer för att få med expertkunskap, se till exempel Olsson & Berggren (2010).

Man behöver också ha i minnet att AI-lösningar är av typen ”black box” och att det inte går att se grunderna för vald klassning och att det kan finnas systematiska fel (bias).

9 **KOMMERSIELLA ASPEKTER**

För att bildbaserade metoder skall komma till mer spridd användning måste de vara kommersiellt intressanta för användare. Man kan därvid titta på användningsområden och användarkategorier.

9.1 **Användningsområden**

Här begränsar vi oss till områden med geoteknisk anknytning, även om metoderna i sig kan tillämpas på andra områden där man vill upptäcka/följa upp skador, t.ex. nerbrytning/förslitning. Olika tillämpningar beskrivs i Kapitel 8.

9.1.1 **Besiktning före schakt etc.**

Före schaktarbeten görs normalt en besiktning av omgivningen, särskilt byggnadsverk. Med bildbaserade metoder kan den göras mer omfattande och snabbare. Man kan, om så önskas, inskränka sig till att ta bilderna och skjuta upp en analys till senare.

9.1.2 **Övervakning under markarbeten**

Under markarbeten kan man övervaka både omgivningen och sponter etc. för att upptäcka hotande förändringar.

9.1.3 **Kontroll av snabba rörelser**

Digital Image Correlation kan användas för att möta rörelser vid snabba förlopp, till exempel för att kontrollera rörelser av trafiklast.

Kan möjligen även användas vid kontroll av vibrationsorsakade rörelser.

9.1.4 **Observationsmetoden**

Observationsmetoden innebär ofta kontroll av hur konstruktioner beter sig under arbetets fortskridande. Bildbaserade metoder kan ibland ge en större flexibilitet och större omfattning hos kontrollen, så att tillförlitligheten ökar.

9.2 **Tänkbara användare**

9.2.1 **Myndigheter**

Metodikern kan vara av intresse för myndigheter som har driftansvar för någon anläggning. Som byggherre kan myndigheter ibland ha strikt ansvar för vissa arbeten.

9.2.2 **Entreprenörer**

Övervakning under arbetet, kontroll före (ansvarsfrågan och skadeståndskrav). Effektiv kontroll kan kanske påverka försäkringspremier.

9.2.3 Försäkringsbolag

Dokumentera före och under arbeten med hänsyn till eventuella skadeståndsanspråk.

9.2.4 Privatpersoner

Själva dokumentera före arbeten (eventuella skadeståndsanspråk)

9.3 Användning vid liknande tillämpningar

Bildbaserade metoder för övervakning används inom en del fält med geo-anknytning, t.ex. Structural Health Monitoring (tillståndsövervakning av byggnadsverk), bro- och tunnelinspektion.

9.3.1 Structural health monitoring

Inom *Structural health monitoring* är bildbaserade metoder mycket användbara, se till exempel Ye, Dong & Liu (2016)

9.3.2 Broinspektion

Användning vid broinspektioner ökar stadigt, bland annat med användning av drönare, se t.ex. Rau et al (2017) och Gillins et al (2018).

9.3.3 Tunnelinspektion

En hel del arbete har gjorts när det gäller tillämpning av bildbaserade metoder på tunnlar. I Sverige pågår BeFo projekt 357, där sådana metoder studeras

9.4 Pågående utvecklingsarbeten

Vi har funnit i litteraturen att det pågår ett omfattande utvecklingsarbete på många ställen.

Vi har haft kontakt med KTH där arbete pågår på avdelningen för Betongbyggnad i samarbete med avdelningen för Geoinformatik och med Dr McCormick vid NPL Material Centre i Storbritannien. På båda dessa ställen pågår utveckling med nära koppling till problemställningen-

- Abbas, A., Spross, J., Johansson, F., Larsson, F., 2018. Storskalig kartering av skredbenägenhet i västra Götaland med artificiell intelligens. *Grundläggningdagen 2018*
- Barazetti et al, 2014. Photogrammetric techniques for monitoring tunnel deformation *Earth Science Informatics* 7(2)
- Bartoš, K., Pukanská, K. & Sabová, J., 2014. Overview of Available Open-Source Photogrammetric Software, its Use and Analysis. *International Journal for Innovation Education and Research www.ijer.net* Vol. 2-04, 2014
- Bjerrum, L. (1963), Allowable Settlement of Structures. *Proc., European Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., Weisbaden, Germany, Vol. 3*, pp. 135-137.
- Carenvali, L., Ippoliti, E., Lanfranchi, F., Menconero, S., Russo, M., Russo, V., 2018. Close-range mini-uavs photogrammetry for architecture survey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2, 2018*
- de la Torre García, J., 2013. A platform for automatic 3D object reconstruction through multi-view stereo techniques for mobile devices. MSc Thesis. Universitat Politècnica de Barcelona (UPC)
- Eriksson, Chr. 2019. Personlig kommunikation. Iris-M se <https://www.rдитеchnologies.com/>
- Eurokod (2005) SS-EN1997-1_2005
- Gaich, A., Pötsch, M. & Schubert, W., 2006. Basics, principles and application of 3D imaging systems with conventional and high-resolution cameras. *Workshop on the Use of Modern Technologies for Rock Face Characterization*. Golden, CO
- Gaich, A., Pötsch, M. & Schubert, W., 2012. Recent developments in the application of 3D imaging for tunnelling. *Eurock 2012*.
- Gillins, D., Parrish, C., Gillins, M., Simpson, C., 2018. Eyes in the sky: bridge inspections with unmanned aerial vehicles. *Report No. FHWA-OR-RD-18-11*
- Goesele, M., Snavely, N., Curless, B., Hoppe, H., Seitz, S., 2007. Multi-View Stereo for Community Photo Collections. *Proceedings of ICCV 2007, Rio de Janeiro, Brasil*
- Hallermann, N., Morgenthal, G., Rodehorst, V., (2014). Vision-based deformation monitoring of large scale structures using Unmanned Aerial Systems. *IABSE Symposium 2014*, Madrid
- Hermanson, J., 2019. Personlig kommunikation.
- Hintze, S. (1994), Risk analysis in foundation engineering with application to piling in loose friction soils in urban situations. Avhandling KTH
- Karlsruud, Kj., 2015. DP1+2 Erfaringsinnsamling og analyse av skadeårsaker. Metoder for vurdering av skader på bygninger som følge av deformasjoner i grunnen. BegrensSkade Delrapport nr. 1+2.5
- Koff, M., 2009. Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils. literature survey F531. Deltares.
- Kujawińska, M., Malesa, M., Malowany, K., (2013). *Measuring structural displacements with digital image correlation*. SPIE Newsroom. 18 September 2013.

- Luhmann, Th., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J., 2014. Close-range photogrammetry and 3D imaging. 2nd edition. De Gruyter, Berlin.
- Malesa, M., & Kujawinska, M., 2012. Modified two-dimensional image correlation method with capability of merging data distributed in time. *Applied Optics*, Vol 51, No 36
- Malesa, M., & Kujawinska, M., 2013. Deformation measurements by digital image correlation with automatic merging of data distributed in time. *Applied Optics*, Vol. 52, No. 19
- Massarsch, K. R. (1976). Soil Movements Caused by Pile Driving in Clay. Avhandling KTH
- McCormick, N. & Lord, J., 2011. Image based techniques for monitoring large civil structures: Hastings Pier. National Physics Laboratory. Nerladdad från: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/image_mccormick.pdf
- McCormick, N., Jonas, D., Lane, B., 2014. Digital imaging for condition asset management (DIFCAM). *RRUKA Annual Conference*, 21 November 2013
- McCormick, N., Kimkeran, S.A., Najimi, A., Jonas, D., 2014. Assessing the condition of railway assets using DIFCAM: Results from tunnel examinations. *6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014)*
- Meyerhof, G. G., 1953, Some recent foundation research and its applications to design. *The Struct. Engr.*, 31(6), 151-167.
- Micheletti, N., Chandler, J., Lane, S., (2015). *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry*. Geomorphological Techniques, Chap. 2, Sec. 2.2. British Society for Geomorphology
- Netzel, H., 2004. *Building settlement damage criteria, angular distortion or deflection ratio?* 13th International Brick and Block Masonry Conference Amsterdam.
- Nishiyama, S., Minakata, N., Kikuchi, T. & Yano, T., 2015. Improved digital photogrammetry technique for crack monitoring. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), pp. 851-858.
- Ny Teknik 2019. <https://www.nyteknik.se/automation/autonom-dronare-fran-flypulse-till-elbolag-6951166>
- Olsson, L., & Berggren, B., 2010. System för utvärdering av indikatorer och observationer. *Rapport projekt F08-6661/AL50*, SGI
- Photodeler Technologies https://www.photodeler.com/kb/factors_affecting_accuracy_in_photogramm/
- Polshin, D. E., and Tokar, R. A., 1957, Maximum allowable nonuniform settlement of structures. *Proc., 4th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, London*, 402-405.
- Pötsch, M., 2019. Personlig kommunikation.
- Ravanelli, R., Nascetti, A., Di Rita, M., Bellonia, V., Mattei, D., Nisticó, N., Crespi, M., 2017. A new digital image correlation software for displacements field measurement in structural applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W2, 2017 FOSS4G-Europe 2017*
- Rau et al, 2017. Bridge crack detection using multi-rotary UAV and object-base image analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W6, 2017 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 4–7 September 2017, Bonn, Germany*

- Rupnik et al, 2017. MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards* (2017) 2:14
- See, J., 2012. Visual Inspection: A Review of the Literature. *Sandia Report SAND2012-8590*. Sandia National Laboratories.
- Shervais, K., 2015. Structure from Motion Introductory Guide. UNAVCO. <https://www.unavco.org/education/resources/modules-and-activities/field-geodesy/module-materials/sfm-intro-guide.pdf>
- Sjölander, A., 2019. Utvärdering av fältmetod för mätningar på sprutbetong. SBUF ID: 13332
- Skempton, A. W., and MacDonald, D. H., 1956, The allowable settlements of buildings. *Proc., Institution of Civil Engineers, London, Part 3, Vol.6, 727-768*.
- Snavely, N., Seitz, S, & Szeliski, R., 2006. Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006)*
- Stentoumis, C., Protopapadakis, E., Doulamis, A., Doulamis, N., 2016. A holistic approach for inspection of civil infrastructures based on computer vision techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague,*
- Tannant, D., (2015). *Review of Photogrammetry-Based Techniques for Characterization and Hazard Assessment of Rock Faces*. *International Journal of Geohazards and Environment* 2015 1 (2)
- USACE (2002). Structural Deformation Surveying. US Army Corps of Engineers Engineering Manual EM 1110-2-1009
- Valença, J., Dias-da-Costa, D., Júlio, E., Araújo, H., Costa, H., 2013. Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing. *Measurement* 46 (2013) 433–441
- Wahls, H., 1981. Tolerable settlement of buildings. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. GT11, November, 1981
- Wallgrün et al, 2017. A framework for low-cost multi-platform VR and AR site experiences. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8*.
- Ye, X.W., Dong, C. Z., Liu, T. (2016). *A Review of Machine Vision-Based Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications*. *Journal of Sensors* Volume 2016,
- Zhang, L., & Ng, A., 2007. Limiting Tolerable Settlement and Angular Distortion for Building Foundations. *ASCE GSP 170 Probabilistic Applications in Geotechnical Engineering. Geo-Denver 2007*

SGF Notat

- 1:2004 Packning och packningskontroll av blandkornig och finkornig jord
- 2:2004 Direkta skjuvförsök - en vägledning
- 3:2004 Laborarieutrustningar med stora provdimensioner - en sammanställning
- 1:2005 Våra framtida geotekniska arbetsredskap - en introduktion
- 2:2005 Permeabilitetsbestämning genom laborieförsök
- 3:2005 Packningsresultat ytpackning - väsentliga faktorer analyserade med AHP-3:2007
Laborieprovning för geotekniska utredningar
- 4:2005 Karakteristiskt värde - utredning kring riktlinjer hur vi skall tillämpa Euorkod (EN 1997-1 och EN 1997-2) modellen
- 1:2007 Medlemsmatrikel 2006
- 2:2007 Resultatkontroll genom bestämning av luftporhalt och vattenkvot
- 3:2007 Laborieprovning för geotekniska utredningar
- 1:2009 Jämförande sonderingar – Jb-totalsondering, CPT och hejarsondering
- 1:2013 SGF:s Riktlinjer
- 1:2016 Akustisk JB-sondering, resultat från etapp 1
- 1:2018 Konflytgränsen
- 2:2018 Fallkonförsöket
- 1:2019 Bildbaserad metod för mätning och övervakning av rörelser hos konstruktioner vid geotekniska projekt. Förstudie

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 1800 enskilda medlemmar, med minst två års praktisk erfarenhet av geoteknik. Dessutom ingår ca 30 korporativa medlemmar i form av institutioner, högskolor, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med Grundläggning, ingenjörsgologi och miljöteknik i ett nationellt och internationellt perspektiv.

Föreningen företräder i Sverige den internationella föreningen, the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

I SGF:s Rapport- och Notatserier utges föreningens metodbeskrivningar, monografier och dokumentation från konferenser, temadagar m.m.