



Statens geotekniska institut

Förbättrade kontrollsystem för uppföljning av sättningar

Mattias Andersson, Johan Vium Andersson, Anders Hallingberg,
Bo Lind, Hjärdís Löfroth



SGI Publikation 23

Hänvisa till detta dokument på följande sätt:

Andersson, M, Andersson, J-V, Hallingberg, A, Lind, B & Löfroth, H, 2015. *Förbättrade kontrollsystem för uppföljning av sättningar*. SGI Publikation 23, Statens geotekniska institut, Linköping.

Diarienummer: 1.1-1405-0332

Uppdragsnummer: 15307

Beställning:

Statens geotekniska institut
Informationstjänsten
581 93 Linköping
Tel: 013-20 18 04
E-post: info@swedgeo.se

Ladda ner publikationen som PDF
www.swedgeo.se



Statens geotekniska institut

Förbättrade kontrollsystem för uppföljning av sättningar

Mattias Andersson
Johan Vium Andersson
Anders Hallingberg
Bo Lind
Hjördis Löfroth

Rapporten granskad av: Karin Odén

SGI Publikation 23

Linköping 2015

Förord

Byggande och förvaltning av infrastruktur och bebyggelse är ett av samhällets största åtaganden och att uppnå ett hållbart samhällsbyggande är en stor utmaning. Kraven på att minska miljöbelastningen och omgivningspåverkan vid byggande ökar. Stora mängder jord- och bergmassor uppstår vid markbyggande vilka måste hanteras på ett hållbart sätt. Grundläggningskostnader utgör en väsentlig del av den totala investeringskostnaden i bygg- och anläggningsprojekt och samtidigt visar erfarenheter att de största tekniska riskerna är relaterade till geotekniska frågeställningar såsom markens hållfasthet samt hur olika typer av utförande och konstruktioner kan anpassas till markens beskaffenhet. De geotekniska förhållandena måste därför beaktas i den fysiska planeringen för att åstadkomma en hållbar och säker bebyggd miljö samt en effektiv plan- och byggprocess. Ökade risker och skador som uppkommer på grund av bristfällig kännedom om markförhållanden och felaktig grundläggning är ett omfattande problem både för samhället och för enskilda individer och bedöms generera höga merkostnader.

Statens geotekniska institut (SGI) är en myndighet med övergripande ansvar för markbyggande, för att minska risken för ras, skred och stranderosion samt för effektivisering av efterbehandling av förorenade områden.

Genom forskning, rådgivning och kunskapsförmedling arbetar SGI för ett effektivare markbyggande genom att verka för:

- Ökad säkerheten för att minska risker och skador på människor, miljö och egendom
- Minskad miljö- och klimatpåverkan
- Förbättrad kvalitet inom markbyggande
- Ökad produktivitet och minskade kostnader

Föreliggande rapport avser uppdrag ”Förbättrade kontrollsystem för uppföljning av sättningar”. FoU-projektet har drivits inom ramen för forskningsprogrammet BIG (Branschsamverkan i grunden) och huvudfinansierats av Trafikverket, med visst tillskott från SGI. Dnr Trafikverket 2014/22589

I projektgruppen ingår:
 Bo Lind, SGI, Uppdragsledare
 Anders Hallingberg, Trafikverket
 Hjärdis Löfroth, SGI
 Johan Vium Andersson, KTH/WSP
 Mattias Andersson, SGI

Projektet startade i april 2014 och slutredovisas med denna rapport.

Undertecknad har beslutat att ge ut publikationen.

Linköping i september 2015

Helene Kennedy
 Chef Avdelning Geokonstruktioner och skredsäkerhet

Innehållsförteckning

Sammanfattning	8
Summary.....	9
1. Inledning.....	10
1.1 Bakgrund	10
1.2 Syfte.....	10
2. Inventering av kontrollsystem	10
2.1 Behov och inriktning av kontrollsystem	10
2.2 Fokusområden.....	11
2.3 Kontrollsystem för mätning av sättningar	12
2.4 Workshop 2014-12-16	13
3. Beskrivning av kontrollsystem	16
3.1 Fasta geotekniska system	16
3.2 Geodetiska mätmetoder	28
3.3 Geodetisk mätning – Terrestra metoder.....	29
3.4 Geodetisk mätning – Luftburna metoder	38
3.5 Geodetiska metoder – Fjärranalys	39
4. Analys av användningsområden	43
5. Utvecklingspotential och förslag till pilotstudie	44
5.1 Utvecklingspotential.....	44
5.2 Förslag till pilotprojekt.....	45
Referenser.....	46

Sammanfattning

Vid byggande av vägar och järnvägar utförs mätning och uppföljning av sättningar både på anläggningsobjekten och i omgivningen. Det finns en lång rad olika kontrollsystem för uppföljning av sättningar som kan vara användbara i olika situationer. Det handlar om att mäta sättningsförloppen både hos markytan och ytliga objekt och sättningens fördelning ner genom markprofilen. Inom detta projekt har tillgängliga metoder inventerats och en analys har gjorts av användningsområden samt möjligheter och begränsningar hos metoderna. Metoderna har delats in i tre olika typer:

- **Fasta geotekniska system** som bygger på installerade mätkroppar i eller på marken.
- **Geodetisk mätning/ Terrestra metoder** som i huvudsak bygger på mätning från marken.
- **Geodetisk mätning/ Luftburna/ Fjärranalys** som avser analys av större ytor med fjärrtekniker (från flygplan eller satellit).

Genom inventeringen har 17 olika kontrollsystem för mätningar beskrivits. Skilda byggprojekt kräver olika metoder för kontrollmätning av sättningar. Att mäta sättningsförloppet hos en väg- eller järnvägsbank innebär andra frågeställningar är till exempel kontroll av omgivningspåverkan. Det har därför funnits behov av att utvärdera både systemens prestanda, i form av mätnoggrannhet, ytfördelning av mätpunkter med mera, samt metodernas tillämpningsområden. Vissa system är lämpade för att ge en regional överblick av bakgrundssättningar medan andra system är mer lämpade för uppföljning av enskilda objekt. På motsvarande sätt finns system som endast mäter sättningen i ytan medan andra system kan mäta sättningens fördelning mot djupet.

Inventeringen har visat att inget enskilt kontrollsystem kan täcka alla behov för väg- eller järnvägsprojekt. Vi ser för framtiden en stor potential i att utveckla kombinerade system med samordnad insamling och analys av mätdata. Vi bedömer också att det finns utrymme för utveckling av nya, framförallt geotekniska metoder, där sättningsförloppet mot djupet i en markprofil kan registreras automatiskt och på avstånd. Behovet av mätningsnoggrannhet bör utredas vidare för att se hur noggrant man behöver mäta i olika situationer. Vissa system har mätnoggrannhet på mindre än 1 mm, vilket ska sättas i relation till jordrörelser, till följd av bland annat temperaturväxlingar och/eller fuktighetsskillnader.

Rapporten ger en överblick över samtliga inventerade kontrollsystem med beskrivning av prestanda, användningsområden samt fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar.

Summary

The measurement and evaluation of subsidence is an important part of the control-system in construction of roads and railways. There is a wide range of control systems for monitoring of settlement that may be useful in different situations including both surface objects and the distributions of settlements down through the soil profile. Within this project available methods was identified and an analysis has been made of the uses and possibilities and limitations of the methods. The methods have been divided into three different types:

- **Fixed geotechnical systems** based on installed sensors in or on the ground.
- **Geodetic / terrestrial methods** based mainly on measurements from the ground.
- **Geodetic/ Airborne / Remote Sensing** relating to the analysis of larger areas by aircraft or satellite.

The inventory has identified 17 different control systems for measurements of subsidence. Different construction projects require different methods where the building of a road or railway embankment involves other questions than, for example, control of surrounding buildings. It has therefore been necessary to evaluate both the performance of the systems, regarding e.g. accuracy or spatial distribution of the measuring points, as well as the application of the methods in different construction projects. Some systems are suitable to provide a regional overview of the background settlements, while other systems are more appropriate for monitoring individual items. Similarly, there are systems that measure only the movement of the surface, while other systems can measure the distribution of settlement with depth.

The survey has shown that no single control system can cover all the needs of road or railway projects. For the future we can see a great potential in developing combined systems with coordinated collection and analysis of measurement data. We also believe that there is a room for the development of new, particularly geotechnical methods, where the progress of settlements with depth in a soil profile can be recorded automatically and remotely. The need for measurement accuracy should be investigated further to see how accurately you need to measure in different situations. Some systems are accurate to less than 1 mm, which should be related to ground movements due to e.g. changes in temperature and / or water content.

The report provides an overview of 17 control systems with a description of the performance and advantages or disadvantages in road- and railroad projects.

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Vid byggande av vägar och järnvägar utförs olika typer av sättningsuppföljningar på objektet och i omgivningen, såväl med geoteknisk som med geodetisk mätteknik. Dagens mätsystem är dock inte alltid optimala till exempel bygger kontrollsystem för att mäta sättningar såväl ytligt (slangsättningsmätare och geodetisk mätning) som på djupet (bälgslangar), på att man har åtkomst från markytan. Det finns behov av att värdera om optimal långtidsuppföljning av sättningar kan erhållas genom en kombination av geodetisk och geoteknisk mätteknik tillsammans med till exempel sättningsmätningar med satellit (InSAR). Mätningar av sättningar med geodetiska eller satellitburna mätsystem kan, om de utnyttjas som komplement till geotekniska mätningar, innebära en stor kostnadsbesparing i förhållande till dagens metoder samtidigt som det innebär både många fler mät-punkter och fler mättillfällen, och därmed en bättre bild av sättningsförloppet.

1.2 Syfte

Projektets syfte har varit inventera om en mer optimal långtidsuppföljning av sättningar kan erhållas genom en kombination av geodetisk och geoteknisk mätteknik, eller kontrollsystem, tillsammans med exempelvis sättningsmätningar med satellit (InSAR). Projektet begränsas till rörelser i vertikalled (sättningsrörelser) i lös jord.

Tillgängliga geotekniska och geodetiska metoder har inventeras och en analys har gjorts av användningsområden samt såväl möjligheter som begränsningar hos metoderna. Slutligen ges förslag på praktisk utvärdering av ett integrerat system för sättningsmätning av enskilda objekt och större områden.

2. Inventering av kontrollsystem

Genom inventering och litteraturgenomgång, sökning på internet och kontakter med Norge, Nederländerna och Schweiz har en skanning av möjliga alternativa geotekniska metoder för sättningsmätning på stora djup genomförts. Pågående internationellt arbete med standardisering av extensometer i TC341/WG1/TG2 har också följts upp.

På motsvarande sätt har en sammanställning av geodetiska mätmetoder gjorts. Erfarenheter har också samlats in från sättningsmätningar som genomförts inom Trafikverkets projekt, Västlänken samt Bana Väg i Väst.

2.1 Behov och inriktning av kontrollsystem

Det finns en lång rad olika kontrollsystem för uppföljning av sättningar som kan vara användbara i skilda situationer. En nödvändig förutsättning för val av system är väl definierade behov. Vissa av Trafikverkets behov är övergripande och gäller generellt för de flesta situationer, medan andra behov är specifika för enskilda väg- eller järnvägsprojekt. Uppföljning av långsträckta objekt som vägar och järnvägar kräver att man hittar kritiska punkter där sättningarna kan följas och kopplas

till de avsnitt där sättningar är mest kritiska. Kopplingen kan vara direkt – på så sätt att man mäter i de kritiska avsnitten, men kan också vara indirekt genom att man kan överföra mätresultat från en näraliggande representativ punkt till situationen på den kritiska punkten. Förutom kontroll av markytans sättningsrörelser krävs i många fall kunskap om sättningarnas fördelning mot djupet, bland annat för att verifiera geomodeller och sättningsprognoser. Följande lista har sammanställts över Trafikverkets behov av sättningsmätningar (Anders Hansson, Anders Hallingberg):

- Klarlägga bakgrundssättningar
- Hitta karakteristiska uppföljnings-/provtagningspunkter
- Kalibrering av beräkningar
- Kontrollera skyddsobjekt
- Kontrollera förväntat beteende
- Styra process (Aktiv design)
- Kontroll av sättningar som underlag för larm
- Erfarenhetsåterföring

Med ”bakgrundssättningar” menar vi sättningar eller andra, både vertikala och horisontella, markrörelser som pågår oberoende av det aktuella väg/järnvägsprojektet. Bakgrundssättningarna studeras över ett område som omfattar minst den omgivning som kan komma att påverkas av väg/järnvägsprojektet – det vill säga vanligen i storleksordningen något till några hektar.

I tillägg till ovanstående lista kan nämnas att sättningsmätningar också måste ske för uppföljning av entreprenader, kanske särskilt funktionsentreprenader där specifika krav för sättningar ofta ingår.

2.2 Fokusområden

Sättningsmätningar behöver innefatta både mätning av markytans sättningsrörelser och sättningsförloppets fördelning mot djupet i markprofilen. Behoven varierar mellan olika byggprojekt och det krävs flera olika mättekniker för att täcka behoven.

Ytterligare ett generellt fokus är att hitta system som inte kräver tillgång till markytan för avläsning, det vill säga mer eller mindre automatiserade system som kan avläsas utanför trafikområdet.

Marksättningar handlar huvudsakligen om långsamma förlopp men Trafikverket följer även periodvis sättningar där sättningsförloppet sker snabbt. De tidsaspekter som är av intresse att följa upp är; retrospektiva, realtid och över lång tid.

- Retrospektiva sättningar är intressanta ur ett Trafikverksperspektiv för att identifiera bakgrundsrörelser samt för att hitta karakteristiska punkter för uppföljning.
- Realtids- och långtidsmätningarna är av intresse för att kalibrera de modeller och parametrar som tagits fram, kontrollera att sättningarna följer de mönster som modellerna förutsätter, övervaka skyddsobjekt samt ge erfarenhetsåterföring.
- Realtidsmätningarna fyller även ett syfte att eventuellt styra byggprocessen, välja byggmetoder och agera som varningssystem om något oförväntat händer.

Mot bakgrund av systemens funktion identifierades följande egenskaper och erfarenheter som grund för utvärdering:

- Typ av system
- Mätning av markytans rörelser
- Mätning av sättningsfördelning mot djupet
- Sättningsöversikt över större områden
- Lämplighet för långa mätserier
- Lämplighet för korta mätserier
- Lämplighet för mätning med glesa intervall
- Lämplighet för mätning med täta intervall
- Spatial upplösning
- Mätningar i realtid (automatiserad avläsning)
- Mättnoggrannhet (standardosäkerhet)
- Fördelar med systemet
- Nackdelar med systemet
- Övriga kommentarer

2.3 Kontrollsystem för mätning av sättningar

Genom inventeringen listades 17 olika kontrollsystem för mätning av sättningar vilka beskrivs nedan. Några av dessa system förekommer med mindre varianter eller ”dialekter”, där inte alla beskrivs i detalj. Vi har valt att skilja på tre olika typer av mätsystem:

- **Fasta geotekniska system** som bygger på installerade mätkroppar i eller på marken.
- **Geodetisk mätning/Terrestra metoder** som i huvudsak bygger på mätning från marken.
- **Geodetisk mätning/Luftburna/Fjärranalys** som avser analys av större ytor med fjärrtekniker (från flygplan eller satellit).

Fasta geotekniska system

Markpegel

Skruvpegel/ASAT (Automatisk sättningsmätare)

Horisontalslang

Extensometer typ: Bälgslang

Extensometer typ: Magnetsättningsmätare

Fiberoptik

EMU-spolar

SAAF

Geodetisk mätning/Terrestra metoder

Avvägning

Trigonometrisk mätning

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) (GPS med flera)

Lidar

GBInSAR

Hydrostatisk nivellering

Geodetisk mätning/Luftburna/Fjärranalys

LIDAR (Light detect and ranging)

Fotogrammetri

InSAR, DInSAR, (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

2.4 Workshop 2014-12-16

En workshop med deltagare med erfarenhet och kunskap om sättningsmätningar arrangerades i Göteborg den 16 december 2014. Följande punkter behandlades – presentationerna finns tillgängliga på BIG:s webbplats:

Introduktion till projektet (Bo Lind)

- Behov och krav på sättningsmätningar ur Trafikverkets perspektiv (Anders Hallingberg, Anders Hansson)
- Presentation av geotekniska mätsystem (Hjördis Löfroth, Mattias Andersson)
- Presentation av geodetiska mätsystem (Johan Vium Andersson, Michael Ledwith)
- Diskussioner i två grupper om mätnoggrannhet, robusthet, för- och nackdelar med olika metoder
- Gemensam diskussion kring kombination av geotekniska och geodetiska mätsystem
- Summering och lunch i samma lokal

Deltagare:

Anders Hansson, Trafikverket

Andris Vilumson, Fastighetskontoret Göteborg

Michael Skoglund, Trafikverket

Per Isaksson, Trafikverket

Anna-Maria Edvardsson, Stadsbyggnadskontoret Göteborg

Michael Ledwith, Metria

Roger Smedberg, Trafikverket

Projektgruppen:

Bo Lind, SGI

Anders Hallingberg, Trafikverket

Hjördis Löfroth, SGI

Johan Vium Andersson, KTH/WSP

Mattias Andersson, SGI

Under Workshopen gicks samtliga listade system igenom där mätnoggrannhet, användningsområde, fördelar och nackdelar diskuterades. Arbetet resulterade i en samlad matris över samtliga system, Figur 2.1.

I matrisen har systemens huvudsakliga användningsområde och mätintervall markerats. Det angivna användningsområdet avseende uppföljning av markytans rörelser eller rörelser på djupet i markprofilen, har angetts utifrån både dagens huvudsakliga tillämpning och möjliga identifierade tillämpningar. Därför har till exempel fiberoptik och SAAF markerats även för mätningar på djupare nivåer, även om erfarenheterna av detta är mycket begränsade för lösa jordar.

Av sammanställningen framgår att flertalet fasta geotekniska system kan mäta både markytans rörelser och sättningar på djupet medan geodetiska system endast mäter markytan, eller strukturer på ytan. Ett flertal system lämpar sig för både korta och långa mätserier. Automatiserad mätning med täta intervall kan i första hand utföras med system av typen totalstationer eller GNSS. För mätning över större ytor lämpar sig i första hand geodetiska fjärranalyssystem.

Geotekniska system och terrestra geodetiska system har ofta en mätnoggrannhet på 1-5 mm under gynnsamma förhållanden, medan GNSS och övriga satellitbaserade system har mätnoggrannhet på någon centimeter.

I följande avsnitt ges en kortfattad beskrivning av respektive system.

Fasta/Geotekniska system	Markytan	Nivåer i jordprofilen	Sättningsöversikt	Långa serier	Korta serier	Glesa intervall	Täta intervall	Spatial upplösning	Realtid (automatiserad avläsning)	Mätnoggrannhet (standardosäkerhet)	Fördelar	Nackdelar	Kommentar
Markpegel	x			x	x	x		punkt		1-4 mm	Enkel att installera och robusta		Mätnoggrannhet beroende på avvägningens och fixens kvalitet
Skruppegel		x		x	x	x		punkt		1-4 mm	Enkel att installera och robusta		Mätnoggrannhet beroende på avvägningens och fixens kvalitet
Horizontalslang	x			x	x	x		flera punkter utmed markyta (horisontell linje)		1-4 mm	Flera mätpunkter utmed en horisontallinje	Något svårt att om det är väldigt undergrund. problem med vatten vilket leder isproppa	Mätnoggrannhet beroende på avvägningens och fixens kvalitet. Upp till 50 m längd
Extensometer typ: Bälgslang		x		x	x	x		flera punkter mot djupet (vertikal linje)		1-5 mm	Flera mätpunkter utmed en vertikallinje, mätning i flera nivåer	Blir obrukbar deformationerna väldigt	Ner till 45 m djup
Extensometer typ: Magnetsättningsmätare		x						flera punkter mot djupet (vertikal linje)		?	Flera mätpunkter utmed en vertikallinje, mätning i flera nivåer		Svårt med erfarenhet
Fiberoptik	x	x						flera punkter mot djupet (vertikal linje) eller utmed markyta (horisontell linje)			Fördelad mätning över långa distanser, Okänsliga för elektromagnetiska fält och kemikalier,	Temperaturkänsliga, mäter också	Installerade i ex broar i Sthlm. Rel vanligt internationellt i dammar, pipelines, broar etc.
ASAT (Automatisk sättningsmätare)	x	x		x	x	x		flera punkter mot djupet (vertikal linje)					Liknar bälgslang med en fast punkt i botten
EMU-spolar	x	x		x	x			punkt		?			Nyttjas inom vägbyggnad för kontroll av väggkroppen. Rel ytliga installationer
SAAF	x	x						flera punkter mot djupet (vertikal linje) eller utmed markyta (horisontell linje)					TrV- upphandlat av Catus Geo, Norge, för kontroll av vägbanken i Stora Helvetet, Jämtland.
Geodetisk mätning/ Terrestra metoder													
Avvägningar	x				x	x		punkt	Nej	1-4 mm	liten mätosäkerhet, Traditionellt vedertagen metodik	Personal intensiv (min personer)	Lysande latta för kvällsmätning. Bäst för fåtal mätningar med långa intervall.
Trigonometrisk mätning	x				x	x		punkt	Ja/Nej	2-10 mm	Traditionellt vedertagen metodik	Kräver optisk sikt , instrument,	Korresponderande system, kan mäta ofta.
GNSS (Global Navigation Satellite Systems) (GPS med flera)	x			x	x	x	x	punkt	Ja	5- 15 mm		Fri sikt till nödvändig. Problem vid	Realtidsmätning - ca 8mm noggrannhet
Lidar	x			x	x	x	x	punkt (yta)		5-10 mm		Lämpligheten för sättningsmätning kan ifrågasättas	Markbaserat. efterarbete. Max 500 räckvidd
GBInSAR)	x				x	x		yta		2-10 mm		Kostsam, LOS, mindre lämplig för sättningsmätning	Anv bl.a. i Norge bergssluttningar
Geodetisk mätning/Fjärranalys													
LIDAR (Light detect and ranging)						x		yta	Nej				
Fotogrammetri						x		yta	Nej				
InSAR (DInSAR, (Interferometric Synthetic Aperture Radar)	x		x	x	x	x		yta	Nej	5-15 mm	Gratis satellitdata snart tillgängliga	LOS. Ny teknik	Kantiga objekt, ex Minst 5 mätningar - ca 2 månader.

Figur 2.1 Kontrollsystem för mätning av marksättningar.

3. Beskrivning av kontrollsystem

3.1 Fasta geotekniska system

Generellt lyftes problemet med att peglar ofta förstörs i samband med produktion. Ett problem är också att systemen i stor utsträckning kräver tillgång till markytan eller omfattande installationer för automatiserad mätning i varje punkt, till exempel ASAT (SGI – Automatiska sättningsmätare). Mätning med bälgslang har i en del fall visat för stor sättnings i de ytliga lagren. Detta tros bero på att slangen, som sträcks vid installationen, inte växt fast ordentligt utan dras ihop i den över delen.

Stort intresse visades för fiberoptisk mätning och SAAF. Råder dock viss osäkerhet kring hur dessa metoder kan användas för att mäta vertikala sättnings.

3.1.1 Markpegel

Markpegel utgörs av en platta eller en jordskruv med varierande diametern, ofta omkring 200 mm, påsvetsad på stålrör.

Markpegeln installeras vanligen ytligt och grävs eller roteras ned i det översta jordlagret (0,3-0,5 m) på avsedd plats för mätning. Överst på stängens finns ett lock eller liknande med en mät dubb. Kontroll av pegelns vertikala rörelse utförs sedan med hjälp av avvägning av pegelns mät dubb. Markpegel kan också installeras på större djup, till exempel under bankar, genom att stängerna förlängts upp genom fyllningen.



Figur 3.1 Till vänster visas en bild på en markpegel före installation och till höger visas en färdiginstallerad markpegel. (Foto SGI).

Systemet är enkelt och ofta nyttjat bland annat i Sverige. Mät noggrannheten är beroende av vilka behov som finns i det aktuella projektet och vilken avvägningssmetod som används. Generellt kan sägas att peglar kan avvägas med en noggrannhet på 1-4 mm. En kritisk del i systemet är att det krävs tillgång till närbelägen fast referenspunkt.

Det är ett problem att peglar ofta förstörs i samband med produktion. Ett problem är också att systemen i stor utsträckning kräver tillgång till markytan, även om distansavläsning av peglarna är möjlig. Systemet ger ett mått på totalsättningen i ytan och ingen information om sättnings fördelning mot djupet.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Markpegel

Fördelar	Nackdelar
Enkelt system	Kräver manuell mätning (avvägning)
God noggrannhet	Närbelägen fixpunkt krävs
	Sårbart för åverkan
	Ger ingen information om sättningsfördelning i djupled

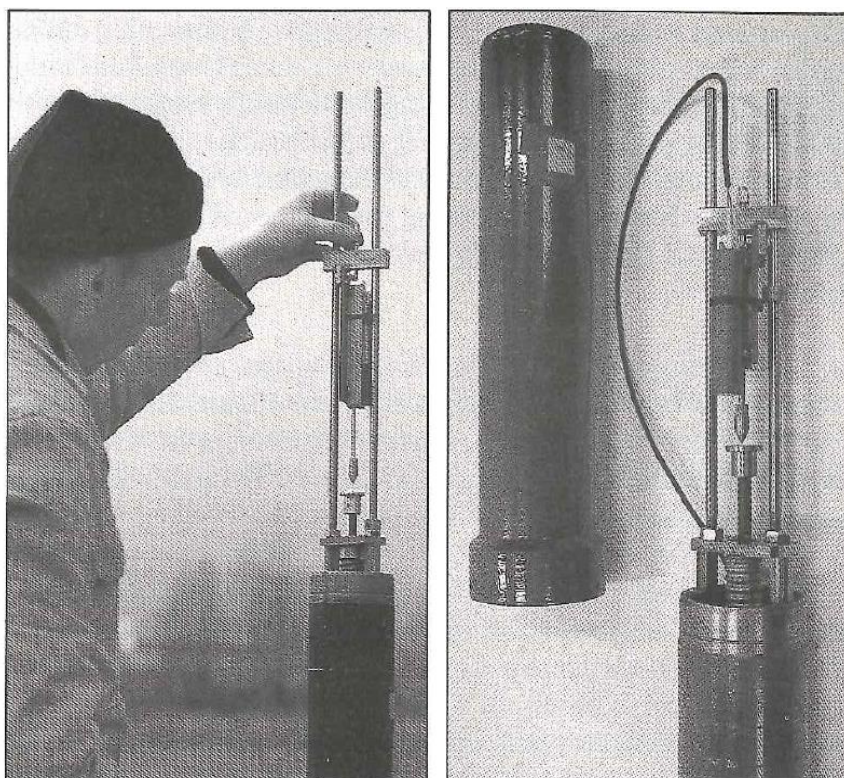
3.1.2 Skruvpegel/ASAT (Automatisk sättningsmätare)

Skruvpegel har liknande konstruktion som markpegel men installerats med foderrör på varierande djup under ursprunglig markyta, i syfte att mäta sättningsförloppet på olika nivåer, Figur 3.2. Vid torrskorpa förborras ett hål för att föra ned pegel och foderrör. Vid sättningsmätningar bestäms skruvpegelns vertikala rörelse med hjälp av avvägning av skruvpegelns topp ovanför markytan, på samma sätt som för markpegel.

Ett system för automatiserad mätning, ASAT, av sättningen hos nedskruvade peglar utvecklades av SGI i början av 1990-talet (Möller & Åhnberg 1992). Pegelns skruvspets roteras ner med foderrör och en typ av töjbar bälgslang som skydd för en inre skarvad stålstång som överför skruvens sättningsrörelser till en fast monterad potentiometer vid markytan. Potentiometerns rörelser kan avläsas kontinuerligt och ge en bild av sättningsförloppet, Figur 3.3.



Figur 3.2 Spets av skruvpegel. (Foto SGI).



Figur 3.3 Skruvpegel med automatiserad avläsning, via sänkspets och potentiometer. (Foto SGI).

Systemet med markpegel är relativt enkelt och ofta nyttjat bland annat i Sverige. Mätnoggrannheten är beroende av vilka behov som finns i det aktuella projektet och vilken avvägningssmetod som används. Generellt kan sägas att peglar kan avvägas med en noggrannhet på 1-4 mm. En kritisk del i systemet är tillgång till närbelägen fast referenspunkt. Systemet med automatiserad avläsning (ASAT) kräver installation av fast mätutrustning. Systemet är mycket känsligt och har inte fått någon vidare spridning.

Generellt lyftes problemet med att peglar ofta förstörs i samband med produktion. Ett problem är också att systemen i stor utsträckning kräver tillgång till markytan, även om distansavläsning av peglarna är möjlig.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Skruvpegel/ASAT

Fördelar	Nackdelar
Enkelt system	Kräver manuell mätning (avvägning)
God noggrannhet	Närbelägen fixpunkt krävs
Ger djupinformation med en mätare för varje djup	Sårbart för åverkan

3.1.3 Horisontalslang

Horisontalslangar, eller slangställningsmätare, installeras under väg- och järnvägsbankar för mätning av sättningar. Systemet består av en vätskefylld slang (vanligen polyeten) där slangens nivå, och därmed eventuella sättningar, mäts med hjälp av en elektrisk tryckgivare som förs in i slangen. Horisontalslangen installeras ofta innan överbyggnaden förs på, se Figur 3.4 (Andersson 2012). Installation ska enligt instruktionen ske i ett litet dike och slangen kringfylls med sand. Avläsning av trycknivån (det vill säga slangens nivå) sker punktvis utefter slangen, vanligen med 1 m mellanrum.



Figur 3.4 Installerad horisontalslang. (Foto SGI).

Systemet är relativt enkelt och ganska ofta utnyttjat i Sverige. Mätnoggrannheten är beroende av stabilt mätstativ samt noggrann kontroll av vätskenivåer, men kan generellt sättas till 1-4 mm. En kritisk del i systemet är tillgång till närbelägen fast referenspunkt. Systemet är känsligt för åverkan – inte minst hos de fria ändarna av slangen. Kräver också relativt mycket arbete (tidskrävande) vid avläsning som måste göras manuellt på plats. Erfarenhet finns av horisontalslangar med upp till 50 m längd.

Systemet ger ett mått på totalsättningen i läget för slangen, oftast i ursprunglig markyta under väg- eller järnvägsbanken, men ger ingen information om sättningens fördelning mot djupet.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Horisontalslang

Fördelar	Nackdelar
Enkelt system	Manuell mätning
God mätnoggrannhet	Närbelägen fixpunkt krävs
	Känsligt för åverkan
	Endast information om ytsättning (ursprunglig markytas sättning)

3.1.4 Extensometer typ bälgslang och magnetsättningsmätare

Extensometrar är töjbara och kompressionsbara vertikalt installerade slangar eller rör där förskjutningen kan mätas mellan magnetiska segment utefter slangens. För att få korrekt lägesbestämning bör slangarna förankras i fast botten, till exempel morän. I huvudsak finns två typer av extensometrar, bälgslang respektive magnetsättningsmätare, där framförallt den förra utnyttjats frekvent i Sverige.

Bälgslangar

Vid installationen av bälgslangarna förborras ofta först ett hål med 50 mm jordskruv genom fyllnadsmassor eller torrskorpa. Förborringen ger bälgslangsspetsens skruv en bättre förutsättning att tränga ned i jorden samt en styrning så att installationen utförs så vertikalt som möjligt.

Bälgslangen består av en plastslang, bottenskruv och skarvhylsor med inkluderad stålring som används vid mätning, se Figur 3.5. Installationen utförs med speciella sättningsrör (tunnväggiga borrstålsrör) avsedda för bälgslang. Bälgslangen skruvas fast vid bottenskruvens vartefter ett sättningsrör träs på och låses fast i en skåra i bottenskruvens. Bottenskruvens fästs i botten under den lösa jorden, till exempel genom att skruvas ner cirka 0,5 m i morän. Därefter spänns bälgslangen upp genom att stoppa i ett innersystem bestående av sticksonderingsstänger, i vilka bälgslangen fästs. I detta läge är det möjligt att dra upp sättningsrören utan att riskera att slangens dras ned i jorden. Syftet med denna uttänjning är att öka slangens mätområde. Bälgslangarna bör stå i ett uppspänt läge i cirka 2 veckor för att ”växa” fast i omkringliggande jord vilket är nödvändigt för att de ska fungera och ge representativa resultat.

Vid mätning av bälgslangen nedförs en givare som är fastsatt i en mätkabel utformad som ett måttband kopplad till en avläsare. Varje gång givaren passerar en stålring (skarvhylsa) som finns utefter slangens, ges ett utslag på avläsningsinstrumentet. På så sätt kan man ha kontroll på skarvhylsans rörelse i vertikallid, vilket indirekt är slangens kompression och därmed sättningsen. Mätningen är relativt tidskrävande.



Figur 3.5 Bälgslangens bottenskruv inklusive monterad bälgslang, till vänster i bilden en grön plastslang. (Foto SGI).

Mätning med bälgslang har i en del fall visat för stor sättning i de ytliga lagren. Detta tros bero på att slangen, som sträcks vid installationen, inte växt fast ordentligt utan dras ihop i den över delen. Installationsdjupen kan vara relativt stora, exempel finns på 45 m djupa slangar. Mätområdet är dock begränsat då slangen kan tryckas ihop cirka 10 % av sin längd. Om installationen har varit lyckad behöver dock sättningarna bli mycket stora innan slangen blir obrukbar, vilket innebär att åtgärder redan bör ha satts in. Mätnoggrannheten är vanligen 1-5 mm för respektive nivå.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Bälgslangar

Fördelar	Nackdelar
Lång erfarenhet i Sverige	Manuell mätning
Ger sättningsprofil i djupled	Begränsat mätintervall
Relativt god mätnoggrannhet	Risk för självsjunkning efter installation
	Osäkerhet kring följsamheten med markrörelsen
	Närbelägen fix krävs för höjdsättning (annars endast mätning av den relativa sättningen i mätpunkten)

Magnetsättningsmätare

Magnetsättningsmätare bygger på samma princip som bälgslang det vill säga en sond som avläser läget av installerade ringar i marken, i det här fallet magnetringar. Magnetsättningsmätare innebär dock att själva mätröret är fast medan installerade magneter rund mätröret följer jordens sättningsrörelser runt röret, i plast. Magneterna brukar utformas som plattor eller skruvar som trycks ner till olika djup för att följa markrörelsen i en jordprofil. Systemet har fördelen att det inte spänns upp och därmed minskar risken för självsjunkning gå grund av förspänning. Systemet kan också mäta stora sättningsrörelser.

Inom projektet har vi inte hittat någon erfarenhet av magnetsättningsmätare i Sverige.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar - Magnetsättningsmätare

Fördelar	Nackdelar
God mätnoggrannhet	Manuell mätning
Ger sättningsprofil i djupled	Begränsad erfarenhet i Sverige
Brett mätområde (små till stora sättningar)	Närbelägen fix krävs för höjdsättning (annars mäts endast den relativa sättningen i mätpunkten)

3.1.5 Fiberoptik

Fiberoptik används allt oftare för kontroll av deformationer bland annat hos krypande sluttningar, tunnlar och olika typer av geokonstruktioner. De optiska fibrerna registrerar töjning och deformation hos den installerade kabeln. Installerade optiska kablar kan fungera under många år och mäta både snabba och långsamma deformationer.

Det finns huvudsakligen fyra tekniker för fiberoptiska sensorer – det vill säga den registrerande fiberinstallationen (Inaudi & Glisic 2007a):

- Fabry-Pérot interferometriska sensorer, punktsensorer som har en enstaka mätpunkt i änden av den fiberoptiska anslutningskabeln. Tekniken bygger på avståndsändring mellan två reflekterande ytor placerade nära änden av mätkabeln. Tekniken kan registrera mycket små avståndsförskjutningar och används för porttrycksmätare, töjningsgivare, temperatursensorer, trycksensorer och förskjutningssensorer.
- Fiber Bragg Gitter sensorer (Grating sensors), multipla mätpunkter längs en fiberoptisk kabel som tillåter mätning i ett flertal punkter. Mätpunkternas läge kan väljas genom att punkterna prepareras med hjälp av intensivt ultraviolett ljus, vilket lokalt ändrar fiberkabelns densitet. Tekniken används för deformationsmätning och temperaturmätning.
- SOFO interferometriska sensorer, lång-bas sensorer, som integrerar mätningen längs en lång mätbas på mellan 20 cm och 10 m. Tekniken bygger på att man mäter längdförändringen mellan två parallella mätkablar där den ena är referens och den andra förankrad i den konstruktion som ska studeras. Används för deformationsmätning och temperaturmätning.
- Lång-bas sensor med Brillouin eller Raman spridning. Dessa har möjlighet att känna förändringar i varje punkt längs en fiberkabel, och mätning kan omfatta till exempel varje meter över flera kilometers längd. Den optiska fibern är själv det avkännande mediet och använder en inre egenskap som sprider en liten del av det ljus som fortplantas genom fibern vid varje punkt utefter dess längd. En del av det spridda ljuset reflekteras bakåt till mätinstrumentet och innehåller information om töjning och temperatur (egentligen fiberens densitet) på det ställe där spridningen inträffade. Tekniken används för töjnings- och deformationsmätning samt temperaturmätning över långa sträckor, till exempel pipelines, dammar eller markrörelser (långsamma skred).

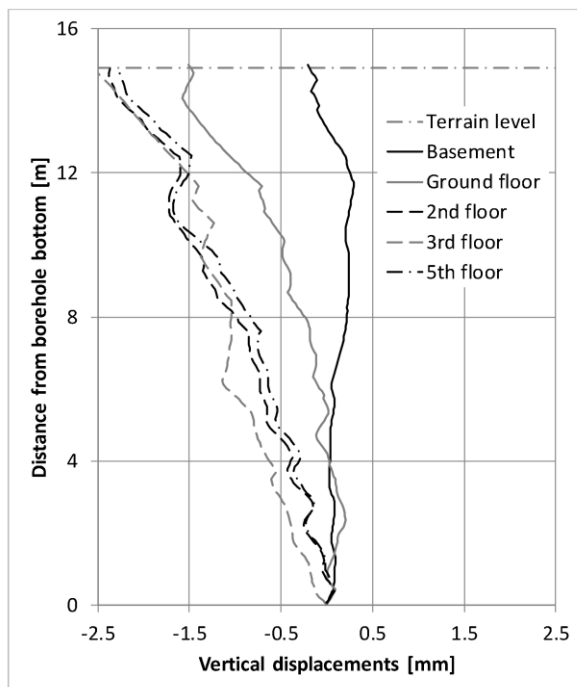
Gemensamt för alla metoder är att den fiberoptiska kabeln är känslig för mekanisk påverkan och måste skyddas med ett hölje, vanligen en plastslang eller ett metallhölje.

För geotekniska applikationer används huvudsakligen tekniker med multipla sensorer eller lång-bas sensorer, för deformationsmätning främst på så sätt att sensorerna gjuts in i en konstruktion. I geotekniska applikationer kan detta vara att de fästs längs armeringen i en påle eller i en dammkonstruktion. Lång-bas sensorer har använts för deformationsmätning bland annat för mätning av töjningsfördelning/bärighetsbeteende hos pålar och förankringar (ingjutna) och för mätning av skredrörelser och sättningar (installerade i borrhål) (Iten et.al. 2012), mätning av rörelse hos gasledning (e.g. Inaudi & Glisic 2007b) och integrerade i geotextiler för mätning av rörelse hos gravitationsdamm och järnvägsbank (Habel & Krebber 2011).

Mätnoggrannheten är mycket stor, över mätsträckor upp till 70 m, och deformationer redovisas ofta i skalor mindre än 1 mm (exempelvis: Iten et al. 2012; Mohamad et al. 2012; Habel & Krebber 2011; Nötter et al. 2012). Optiska kablar för mätning av deformation kan vara upp till flera kilometer långa, men då med begränsad upplösning (Iten et al. 2012). Fiberoptiska sensorer är känsliga för temperaturvariationer, vilket innebär att temperaturen måste mätas samtidigt för att kunna kompensera för temperaturförändringar. Eftersom optiska sensorer också kan mäta temperatur kan en optisk sensor som inte sätts fast placeras i samma hölje vid sidan av den sensorn som ska mäta deformation

Fiberoptik för mätning och uppföljning av deformationer är idag en etablerad teknik och företag finns med omfattande erfarenhet, till exempel Omnisens, baserat i Schweiz. Det finns en omfattande litteratur på området, men inom projektet har vi inte hittat någon geoteknisk tillämpning kring markrörelser i Sverige. Huvuddelen av de exempel som presenteras i litteraturen rör mätningar på konstruktioner, som pipelines, dammar, broar, tunnlar och byggnader. Det finns dock utvecklad teknik också för vertikal installation i jord (Iten et al. 2012). Fiberkabel installerades i ett förborrat hål och har satts till upp till 50 m djup. Kabeln förankras i botten och förspänns (liknande en bälgslang) för att kunna ta upp vertikala sättningsrörelser. Fiberkabeln kopplas ihop med omgivande jord genom att borrhålet fylls med en cementbentonitblandning. Blandningen sätts samman så att den får samma styvhet som omgivande jord.

I en artikel från 2012 beskrivs ett exempel där sättningsmätning utförts i ett 16 m djupt borrhål, dock oklart om det är jord eller berg (Iten et al. 2012). Den aktuella mätningen avsåg att följa marksättningen under det att ett 5 våningar högt hus uppfördes på platsen. Resultatet visade hur sättningen utbildades genom profilen efterhand som lasten (byggnaden) växte, se Figur 3.6. Notera att den uppmätta sättningen endast uppgår till totalt cirka 3 mm. Vi har inte hittat någon uppgift på hur mycket maximal sättning en förspänd fiberkabel kan tänkas ta.



Figur 3.6 Vertikala sättningar längs ett borrhål i samband med successivt ökande markbelastning från husbyggnation. (Från Iten et al. 2012).

Vid sidan av tekniken med optiska fiberkablar, så kallad OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) finns också system där man använder koaxialkablar i stället för optiska kablar, TDR (Time Domain Reflectometry). Även detta system används för töjnings-deformations- och temperaturmätning. Här saknar vi dock beskrivningar på geotekniska tillämpningar.

Sammantaget ser vi fiberoptik som en intressant teknik, men osäkert hur deformation mäts vid vertikal installation i jorden. Däremot borde fiberoptik kunna installeras horisontellt på samma sätt som en slang-sättningsmätare.

Den fiberoptiska tekniken utvecklas snabbt och förspända töjningar för vertikal sättningsmätning kan enligt uppgift uppgå till mellan 10 och 20 % av kabellängden (muntligt BIG VIP-möte 2015-10-21). Med sådana förutsättningar bör tekniken testas också för långsamma sättningar i svenska lerjordar.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Fiberoptik

Fördelar	Nackdelar
Fördelad mätning över långa distanser	Temperaturkänsliga
Okänsliga för elektromagnetiska fält och kemikalier	Expertsystem som kräver särskild kompetens för utvärdering
Precision i mätningar och långtidsstabilitet	Osäkert mätområde med vertikal installation för sättningsmätning.
Klarar stora deformationer	

3.1.6 EMU-spolar

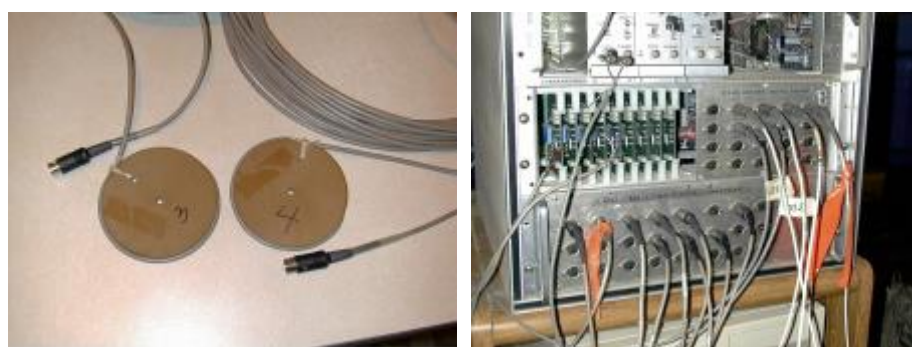
Induktiva spolar, så kallade EMU-spolar (ϵ -strain, Measuring Unit; Janoo et al. 1999) är ett system där lindade spolar parvis placeras med ett visst avstånd, vanligen 1-2 dm, från varandra. Genom att lägga en spänning på den ena spolen skapas ett magnetfält som inducerar en ström i den andra spolen och den utgående spänningen räknas om till avståndet mellan spolarna via kalibreringsdata (Wiman 2010).

EMU-spolar har utnyttjats för mätning av vägdeformationer i mer än 15 år, av publicerade artiklar att döma främst i England och USA (till exempel Janoo et al. 1999). I Sverige har vi hittat att systemet använts av VTI (Wiman 2010), Lunds universitet (Oscarsson 2011) samt i ett par examensarbeten vid Chalmers (Sundblad & Widén 2007; Rimstedt 2006). Spolarna är utformade som cirkulära plattor med diameter cirka 100 mm och tjocklek cirka 8-9 mm, se Figur 3.7.

De geotekniska tillämpningarna vi hittat har uteslutande gällt deformationer i vägar. Såväl vertikal som horisontell deformation kan mätas, genom att spolar placeras parvis och det uppges att det maximala avståndet mellan spolarna är 15-20 cm (Rimstedt 2006). Installationer har gjorts ner till cirka 1 meters djup.

Systemet kräver kablage till varje spole. Installationen sker genom att spolarna grävs ner eller fylls över på olika nivåer i vägkroppen. Systemet tycks därför vara mest lämpat för installation nära markytan och i en uppbyggd konstruktion, såsom en vägbank.

Mätnoggrannheten är mycket hög och resultaten redovisas i skala mindre än 1 mm (Wiman 2010).



Figur 3.7 EMU-spolar med anslutande kablage. (Från Janoo et al. 1999).

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – EMU-spolar

Fördelar	Nackdelar
Hög mätnoggrannhet	Kräver manuell avläsning
Går att avläsa på distans	Känslig installation med kablage
	Relativt ytlig installation
	Ger endast relativt sättningsförlopp
	Kan vara svårt att koppla till referenspunkt

3.1.7 SAAF

SAAF (ShapeAccelArrayField) är en rep-liknande anordning av sensorer och microprocessorer (micro electro mechanical system MEMS) som kan användas för mätningar av vibrationer och deformationer i fält.

SAAF består av en ledad kabel med 305 eller 500 mm långa segment som är länkade samman och där vinkelförändringen mellan de olika segmenten kan mätas med stor precision, Figur 3.8. På så sätt kan en 3D-bild av deformationer erhållas. Systemet kan användas med både vertikal och horisontell installation av mätkabeln. Mätkabeln kan vara upp till 100 m lång. Videopresentationer av tillämpningar finns från Cautus Geo (<https://www.youtube>) och från Measurand, (<http://www.measurandgeotechnical>). För att skydda deformationskabeln rekommenderas att installationen görs i en skyddande PVC-slang (27 mm) med tillräcklig flexibilitet för att följa deformationen (Informationsblad Measurand). En viss uppfattning avseende installation av systemet kan man få från nedanstående foton, Figur 3.9. En SAAF-kabel kan böjas upp till 90 grader och data kan sändas trådlöst eller loggas periodvis till dataenhet.



Figur 3.8 SAAF (ShapeAccelArrayField). Versatile rope-like array of sensors for Geotechnical applications. (Från Cautus Geo AS 2013).



Figur 3.9a Foto på deformationskabel (SAAF) vid installation längs järnväg. (Från Cautus Geo AS 2013).



Figur 3.9b Installation av deformationskabel (SAAF). (Från Cautus Geo AS 2013).

Mätnoggrannhet och erfarenheter

I mars månad 2015 installerade Trafikverket ett SAAF-system för kontroll av vertikala rörelser i järnvägsbanken vid Örabäcken (Stora Helvetet) i Jämtland. Systemet saluförs av Measurand Inc Kanada och levereras till Trafikverket av det norska företaget Cautus Geo AS. Erfarenheterna av systemets funktion är hittills goda (personlig kommunikation Per-Evert Bengtsson, SGI).

Med SAAF kan mätnoggrannhet med millimeterprecision uppnås (Abdoun & Bennett 2008; Barendse 2008). Mätnoggrannheten hos en 32 m lång deformationskabel uppges typiskt vara 1,5 mm deformation. Mätnoggrannheten försämras vid längre kabel och uppges för en 64 m lång kabel vara 2,1 mm (Measurand Inc Kanada, webb-information). Kan mäta över ett stort deformationsintervall.

Systemet kan installeras horisontellt eller vertikalt för kontroll av horisontella eller vertikala rörelser nära markytan. Vi har inte hittat några exempel på mätning av vertikala markrörelser på djupet.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – SAAF

Fördelar	Nackdelar
Mätning kan utföras på distans	Kostsamt att installera (idag cirka 100 tkr för en 20 m lång mätslang, exklusive loggrar och installation).
God mätnoggrannhet	Expertsystem, kräver särskild kompetens för utvärdering.
Kan mäta både små och stora deformationer	Saknas erfarenhet från mätning av långsamma vertikala sättningsrörelser på större djup.
	Ger relativa rörelser och kräver närbelägen fix för kalibrering.

3.2 Geodetiska mätmetoder

3.2.1 Allmänt

Det finns en mängd olika geodetiska mätmetoder med det gemensamt att de används för att mäta in synliga objekt som markytan eller saker på densamma. I fallet sättningsmätning är det frågan om inmätning av fasta geotekniska installationer, alternativt markytan, vid en serie av tillfällen för att studera sättningsförloppen för respektive objekt. Sättningsmätningar utförs normalt kopplat till överordnade koordinatsystem. Detta görs genom att mäta mot fysiskt markerade koordinatsatta punkter. Valet av geodetisk mätmetod och referenspunkter måste göras med utgångspunkt i de behov som finns vid de geotekniska studier som ska utföras utifrån resultatet.

De geodetiska mätmetoder som presenteras för sättningsmätning i denna rapport har vi valt att bedöma utifrån deras egenskaper avseende: spatial täckning, temporal upplösning, möjlighet till automation, kostnad, mätosäkerhet samt en allmän bedömning om användbarhet avseende användning inom sättningsmätning. Detaljer som optimal design och hur man når resultaten beskrivs inte, utan fokus ligger på övergripande egenskaper och tillämpbarhet. Självklart går det att förbättra resultaten avseende mätosäkerhet och tillförlitlighet ytterligare genom optimering och kombination av observationer från flera tekniker men detta är inte ämnet för rapporten. Metodernas retrospektiva egenskaper styrs generellt av tillgången till äldre mätdata.

Geodetiska mätmetoder i denna rapport är uppdelade efter den plattform utrustningen är placerad på det vill säga terrestra där utrustningen är placerad stationärt på jorden, luftburna där utrustningen är placerad på någon typ av luftburen plattform till exempel helikopter, multikopter eller flygplan samt satellitbase-rade där utrustningen är placerad ombord på satelliter som befinner sig i omloppsbana kring jorden. De terrestra metoder som är studerade i denna rapport är: Traditionell avvägning, Trigonometrisk mätning med totalstationer, olika tillämpningar av mätning med GNSS (Global Navigation Satellite Systems), terrester laserskanning, terrester fotogrammetri, Ground based-InSAR samt hydrostatisk nivellering.

Bland de fjärranalytiska metoderna finns luftburen fotogrammetri och laserskanning där plattformen som utrustningen är placerad på normalt utgörs av flygplan eller helikoptrar. Under senare år har även drönare blivit vanligare inom fotogrammetriska tillämpningar i mindre projekt. DInSAR utgör den fjärranalytiska metod där plattformen utgörs av en satellit i omloppsbana.

3.3 Geodetisk mätning – Terrestra metoder

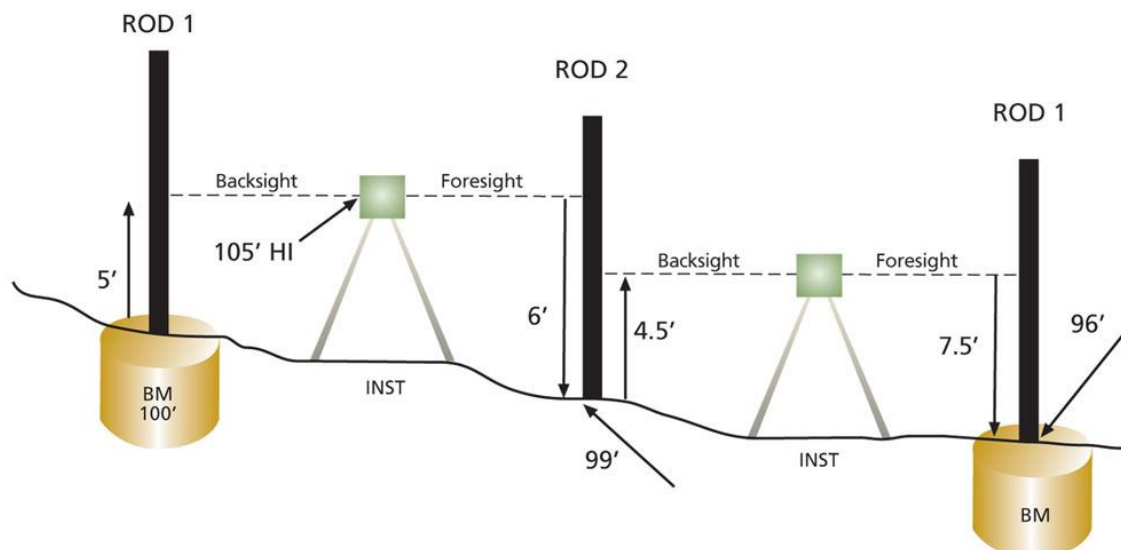
3.3.1 Avvägning

Avvägning kan klassas som den mest traditionella mätmetoden för sättningsmätningar och används för sättningsmätning i de flesta trafikverksprojekt där någon typ av sättningsstudie är aktuell. Anledningen till att avvägning är populär är att den är lättanvänd och ger ett pålitligt resultat. Därtill ska läggas att utrustningen är billig att köpa. Avvägning kräver två personer i fält.

Vid avvägning bestäms höjden på enskilda punkter genom att mäta höjdskillnader till kända punkter. Grundprincip för avvägning är att man mäter höjdskillanden mellan två närliggande punkter med ett avvägningsinstrument och avvägningsstänger. Avvägningsinstrumentet horisonteras så dess siktaxel är vinkelrät mot den lokala lodlinjen. Om avståndet eller höjdskillanden är större än vad som är mätbart mot mätstängerna krävs fler uppställningar och förfarandet ger upphov till ett avvägningståg. Avvägning påverkas av den refraktion som uppstår i luftlagren nära marken som i regel har en annan temperatur än luften. För att minska inverkan från refraktion hålls avståndet mellan instrument och avvägningsstänger nere till cirka 30 meter. Redundansen vid avvägning ökas genom att utföra dubbelavvägning vilket innebär att alla avvägningståg mäts vid två olika tillfällen.

Avvägning utgår från en eller flera stabila höjdfixar med känd höjd. Två rekommenderas i regel dock för att garantera mätserien över tid ifall någon av utgångspunkterna försvinner. I regel är den stora utmaningen vid avvägning tillgången till stabila utgångspunkter inom ett rimligt avstånd till mätområdet. Ofta ligger dessa långt bort vilket även påverkar osäkerheten i resultatet.

Mättingsosäkerheten vid dubbelavvägning uppgår normalt till 1-3 ppm, det vill säga, osäkerheten ökar med 1 till 3 mm per kilometer från känd punkt. Den successiva ökningen av mätosäkerhet medför att avståndet till utgångspunkterna påverkar osäkerheten i resultatet vilket gör att man, för att erhålla ett bra resultat, bör hålla nere avståndet till känd punkt, vilket inte alltid är möjligt. Över korta avstånd kan dock höjdskillnader med en mätosäkerhet på delar av en millimeter uppmätas. Principen för avvägningståg framgår av Figur 3.10. Lämpligheten för tekniken är således långa mätserier med glesa mätintervall.



Figur 3.10 Principskiss för ett traditionellt avvägningståg. (Från ESRI 2004).

Avvägning går i dagsläget inte att automatisera, däremot finns det sedan några decennier digitala avvägningsinstrument där avläsning mot avvägningstängerna automatiserats vilket förbättrat produktiviteten och tillförlitligheten i metoden.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Avvägning

Fördelar	Nackdelar
Enkel metod	Resurskrävande och därmed kostsam
Tillförlitligt resultat	Svår att automatisera
Liten mätosäkerhet	Inte alltid lätt att hitta stabila utgångspunkter
Lämpar sig för inmätning av fasta geotekniska installationer	Kampanjvis mätning med glesa intervall

3.3.2 Trigonometrisk mätning med totalstation

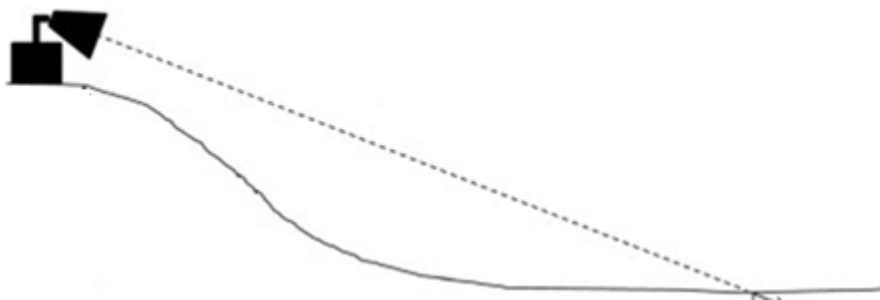
Trigonometrisk mätning baseras på uppmätning av riktningar på vertikal och horisontalskalor samt distanser från instrument till objekt. Metoden kräver optisk sikt mellan instrument och de objekt som ska mätas in. Traditionellt utförs dessa mätningar med totalstationer som är elektroniska teodoliter försedda med elektrooptiska längdmätare (EDM). Uppmätta riktningar och distanser räknas om till koordinater genom att tillämpa trigonometri. Figur 3.11. visar de observationer som görs med en totalstation. Moderna totalstationer kan mäta längder direkt mot ytor men det bästa resultatet erhålls då man mäter mot prismor som reflekterar signalen från längdmätaren tillbaka mot detsamma.



Figur 3.11 Till vänster, totalstationen mäter riktningar i vertikalled, horisontalled och distanser, till höger ett mätprisma av typ Leica GPR112. (Från Leica Geosystems 2015).

Uppmätta riktningar och distanser används för att beräkna koordinater. Precis som vid avvägning krävs vid sättningsmätning minst en fysiskt markerad utgångspunkt men på samma sätt rekommenderas två. Genom trigonometrisk mätning med en totalstation ges även möjlighet att bestämma horisontella rörelser och då krävs även minst två punkter med koordinater i plan.

Då tekniken möjliggör reflektorlös mätning kan sättningsmätning utföras punktvis på ytor. För att detta ska bli möjligt krävs en god infallsvinkel, det vill säga man bör undvika mätning mot ytor som löper parallellt med siktaxeln, se Figur 3.12, samt att man mäter mot hårdgjorda ytor med bra reflektiva egenskaper. Kostnaden för systemen bedöms som hög vilket gör att lämpligheten är störst över korta mätserier med glesa intervall. Installationen av automatiska system görs normalt då kostnaden för manuell mätning överstiger installationen av de automatiska systemen.



Figur 3.12 För att lyckas med inmätning av ytor reflektorlöst krävs en infallsvinkel mot marken som inte är för flack.

Till skillnad från avvägning tillåter trigonometriska mätningar en större höjdskillnad mellan kända punkter och de objekt som ska mätas in då siktlinjen inte behöver vara parallell med horisontalplanet. Resultatet påverkas av refraktion på samma sätt som vid avvägning och därför bör avståndet hållas nere. Vid mätning på avstånd kortare än 200 m är med normal produktionsutrustning den relativa osäkerheten i höjd någon millimeter och på längre avstånd blir osäkerheten större. Försök har gjorts av Lantmäteriet att ersätta traditionella avvägningar med trigonetrisk höjdbestämnings teknik och de konstaterade att tidsåtgången jämfört med traditionell avvägning i tåg är densamma men så också mätosäkerheten, (Becker, et al. 1988).

Det som framförallt begränsar sättningsmätning med totalstationer är väderrelaterade frågor. Regn och dimma gör att automatiken i instrumenten får problem att se objekten som ska mätas in. Vid reflektorlös mätning förändras egenskaperna på de objekt som mäts in och till exempel snö kan lägga sig på marken vilket gör att de ytor som mäts in inte kan nås.

Utvecklingen av totalstationer går kontinuerligt framåt. I den senaste generationen totalstationer finns kameror och skanningsfunktioner. Kamerorna ger helt nya förutsättningar vid monitorering då man kan se vad instrumentet ser då det fjärrstyrs. Laserskanningsfunktionen möjliggör inmätning av många punkter av en liten yta vilket kan öka noggrannheten i slutresultatet, se vidare under Avsnitt 3.3.4.

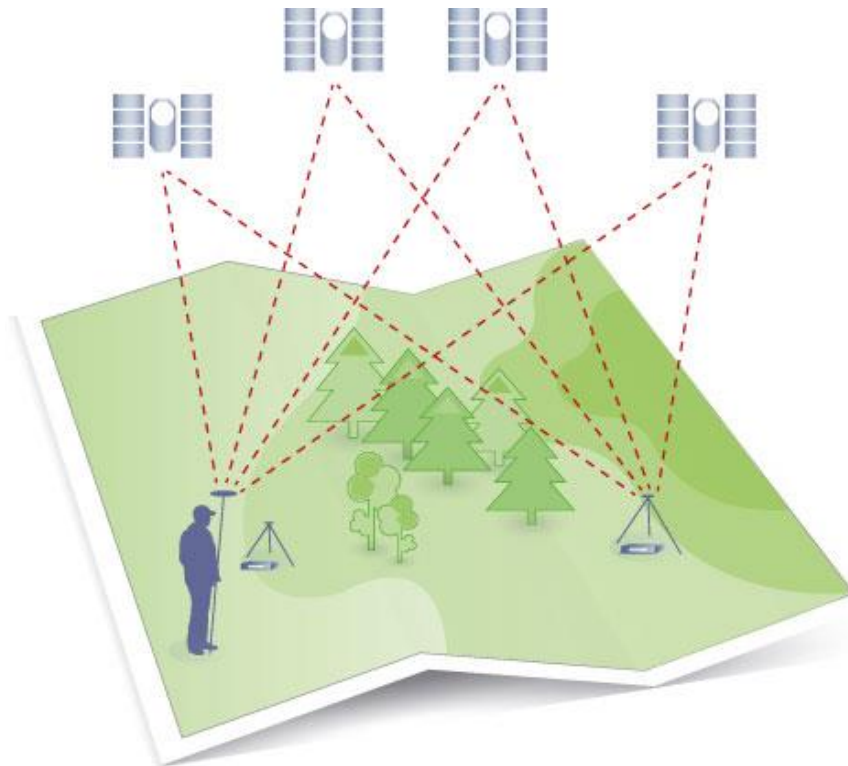
Trigonometriska sättningsmätningar går att automatisera då det är möjligt att fjärrstyra totalstationer. Exempel på Trafikverksprojekt där tekniken använts är: Jordfallsbron i Surte där automatisk övervakning använts i samband med ombyggnation av bron, vid uppföljning av rörelser i befintliga objekt i samband med byggnation av Citybanan i Stockholm samt renoveringen av klaffbron över Hjälmare kanal i Arboga. Automatiserade system har en mycket god temporal upplösning och är lämpliga för både långa och korta tidsserier med både glea och täta observationsintervall.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Trigonetrisk mätning

Fördelar	Nackdelar
Enkel metod	Förhållandevis dyr utrustning
Tillförlitligt resultat	Kräver optisk sikt
Liten mätosäkerhet	Punktvis mätning
Går att automatisera	Väder försvårar mätningarna
Möjligt att mäta markprofiler på marken	
3D- koordinater	

3.3.3 GNSS (Global Navigation Satellite Systems)

Den teknik som under de senaste decennierna revolutionerat geodetisk mätning är de globala satellitnavigeringssystemen (GNSS). Med GNSS möjliggörs mätningar över långa avstånd och med en relativt liten mätosäkerhet. För att nå ett resultat som är användbart vid sättningsmätningar krävs relativ mätning där man använder sig av minst två GNSS-mottagare, en placerad på en punkt med kända koordinater och den andra på den punkt eller de punkter som avses mätas in. Resultatet vid GNSS-mätning påverkas av en mängd olika faktorer, så som antalet tillgängliga satelliter, satelliternas geometri, positionsbestämning av satelliter, satellitsignalens väg genom atmosfären, förutsättningarna på mätplatsen, typ av mätutrustning, avståndet mellan GNSS-mottagarna samt vald beräkningsstrategi. Över korta avstånd har de lokala effekterna på mätplatsen den största effekten på resultatet, men ju längre avståndet mellan mottagarna blir desto större inverkan har de andra faktorerna.



Figur 3.13 Principskiss relativpositionering med GNSS. (Från Lantmäteriet 2015).

Mätningar med GNSS kan utföras både i realtid och genom så kallad statisk mätning. I det senare fallet ges en lägre mätosäkerhet än vid realtidmätning eftersom den bygger på att man samlar in en mängd mätobservationer över en längre mätperiod som beräknas i en efterföljande beräkningsprocess och på så sätt nås en lägre mätosäkerhet än vad som uppnås i realtid.

Under goda förutsättningar för GNSS-mätning uppnås en standardosäkerhet vid mätning i plan på 10 mm + 1 ppm vid realtidmätning och vid statisk mätning uppnås 3,0 mm + 0,5 ppm. I höjd erhålls ett resultat som är cirka 1,5 ggr sämre än i plan. Avståndsberoendet innebär att för att uppnå ett bra resultat bör avståndet till referensstationen hållas så kort som möjligt. GNSS-mätning kan automatiseras helt oavsett om den utförs i realtid eller mäts statiskt med efterberäkning.

Det bör observeras att vid mätning med GNSS-teknik mäts ellipsoidhöjd, det vill säga höjden över den referensellipsoid som används vilket inte får förväxlas med avvägd höjd. För att jämföra avvägda höjder med GNSS-mätta höjden krävs att man modellerar höjdskilladen mellan de båda. Detta görs med geoidmodeller. Lantmäteriet ansvarar för framtagandet av den nationella geoidmodellen

(SWEN08_RH2000). Denna modell har en standardosäkerhet på 10-15 mm i förhållande till avvägda höjder. Då GNSS-mätta höjder ska jämföras med avvägda, så måste hänsyn tas till osäkerheten i såväl mätmetoder som i använd geoidmodell.

GNSS lämpar sig mycket bra för automation. Väl installerade system kan ge positionsangivelser över långa tidsperioder med både täta och glesa tidsintervall. Den spatiala upplösningen i dessa fall begränsas till antalet stationer som etableras på plats.

GNSS-utrustning har tidigare varit kostsam men nu sker en teknikutveckling som är mycket snabb. Med utvecklingen blir GNSS-utrustningen billigare och på sikt tillämpbar för sättningsmätning i stor skala. Ett exempel på detta är IGN (L'Institut national de l'information géographique et forestière) i Frankrike som i ett forskningsprojekt tagit fram små billiga GNSS-mottagare specialdesignade för rörelsemätning. Systemet med enkla små mottagare GéoCubes används för kontinuerlig övervakning av sättningar med en osäkerhet mindre än 10 mm (Benoit, et al. 2014).



Figur 3.14 Installation av GéoCubes. (Se Benoit et al. 2014).

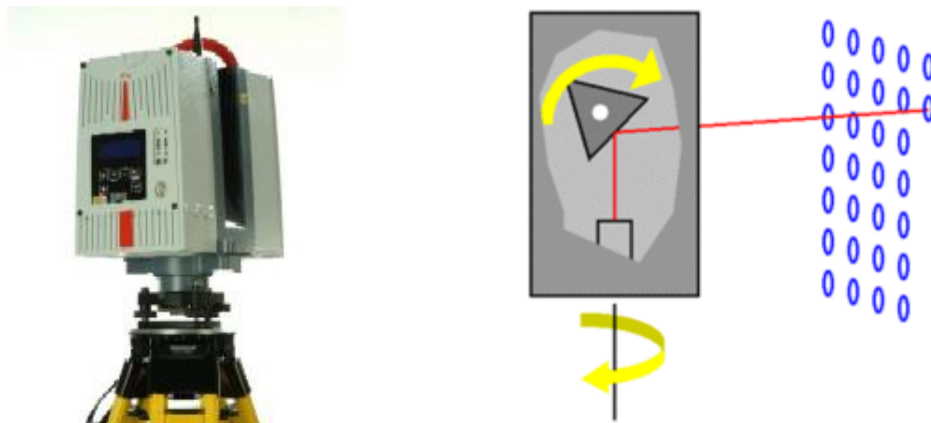
En annan förändring som sker parallellt, är att antalet tillgängliga satellitsystem ökar och att dess signalstruktur förändras. Med fler satellitsystem och ny signalstruktur, kommer förutsättningarna för GNSS-mätning förbättras genom att möjligheten att eliminera de felkällor som stör mätningarna bättre kan elimineras.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – GNSS

Fördelar	Nackdelar
Enkel metod	Punktviss mätning
Långa avstånd	Instrumenteringen är idag dyr men blir avsevärt billigare inom en snar framtid
Går att automatisera (hög temporal upplösning)	Bestämda höjder inte desamma som vid avvägning
3D-koordinater	Till osäkerheten i höjd måste även osäkerheten i geoidhöjd beaktas

3.3.4 Terrester laserskanning (LIDAR)

En tänkbar teknik för sättningsmätning är terrester laserskanning med vilken insamling av en stor mängd punkter utförs över en kort tidsperiod. Akronymen LIDAR står för *Light Detection And Ranging* och systemet består förenklat av en laserskanner av ett roterande prisma som belyses med en pulserande laser så ett roterande laserplan uppstår. Instrumentet mäter prismats rotationsvinklar samt tiden det tar för laserpulsens att komma tillbaka till instrumentet och omvandlar denna information till punkter med koordinater. Skannern roterar i laserplanet kring sin vertikala axel och på så sätt kan ett tredimensionellt punktmoln skapas av omgivningen kring skannern.



Figur 3.15 Till vänster en bild på en laserskanner och till höger visas principen för hur en terrester laserskanner fungerar. (Från Leica Geosystems 2015 och Institut für Kartographie und Geoinformatik 2015).

Metoden begränsas på samma sätt som vid totalstationsmätning av att infallsvinkeln mot objekt nära marken bli för spetsig vilket gör att metoden inte är särskilt användbar vid inmätning av markytor, med undantag då infallsvinkeln går att förbättra genom en hög placering av instrumentet. Lasermolnen som tas fram vid skanning har i sig en bra inre geometri, men för att koppla det till ett yttre koordinatsystem så krävs punkter med kända koordinater.

Räckvidden på en laserskanner varierar, men om man vill mäta med en liten mätosäkerhet bör avståndet inte överstiga cirka 100 meter. Till skillnad från vid mätning med totalstationer så vet man inte var man träffar en yta med en laserskanner. Då laserskanningstekniken används för inmätning av ytor kan sättningsstudier göras genom att jämföra lasermoln mot varandra. Då fasta installationer ska följas måste dessa objekt först identifieras och extraheras ur punktmolnen. Detta görs semiautomatiskt med algoritmer som anpassar punktmolnen till olika kända geometrier. Laserskanning som metod är snabb i fält, men för att få ut objekt ur lasermolnen krävs ett betydligt mer omfattande arbete. En skalfaktor på 1/10 brukar användas som en tumregel. För att tekniken ska vara tillämpbar inom sättningsmätning krävs att de objekt som ska monitoreras signaleras med objekt som går att identifiera i punktmolnen. Mätosäkerheten vid laserskanning beror på objektet man mäter in. I de fall de är väldefinierade uppgår mätosäkerheten till 5-10 mm. Efter bearbetning till objekt kan osäkerheten vid inmätning minskas till 2-5 mm.

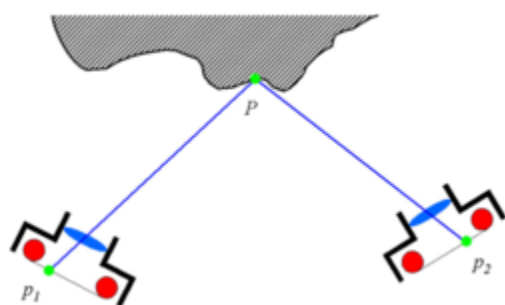
Metoden ger inom sin räckvidd en bra spatial upplösning, men den temporala är begränsad då den kräver återbesök i fält. Utrustningen och nödvändiga programvaror är förhållandevis kostsamma även om utvecklingen går mot mindre och billigare utrustning.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Terrester laserskanning (LIDAR)

Fördelar	Nackdelar
Området man mäter inom blir väldokumenterat	Kostnad, instrument och bearbetning av data
Osäkerhet 5-10mm	Efterbearbetningstid
Begränsad spatial omfattning	Låg temporal upplösning
3D- koordinater	Man vet inte vilka punkter man mäter in

3.3.5 Terrester fotogrammetri

Vid terrester fotogrammetri används kameror för inmätning. Principen för fotogrammetri bygger på att ett och samma objekt förekommer i minst två bilder. Genom att veta kamerans interna geometri och mäta objektens position i bilderna kan man bestämma objektens koordinater. Bildernas geografiska läge erhålls genom att vissa objekt i bilderna har kända koordinater.



Figur 3.16 Fotogrammetrisk stereotolkning av ett objekt P i två bilder

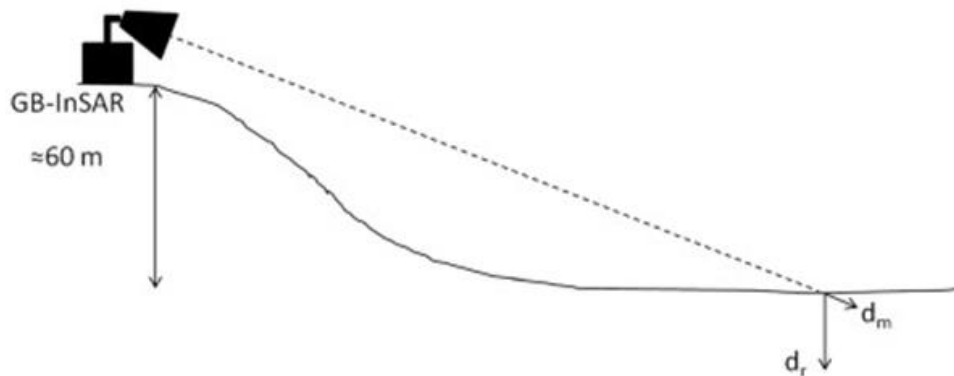
Terrester fotogrammetri ger en bra dokumentation av de objekt som övervakas, men bedöms endast ha ett begränsat användningsområde vid sättningsmätning. Däremot tillämpas tekniken framgångsrikt vid uppmätning av horisontella rörelser i bergssidor och från luften där terrängformerna ger bättre geometriska förutsättningar, se vidare 3.4.1 Luftburen fotogrammetri. Tekniken är optisk vilket gör att sikten kan vara begränsande vid vissa väderförhållanden samt vid variation i vegetation.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Terrester fotogrammetri

Fördelar	Nackdelar
3D	Geometrin ej gynnsam för tekniken
Enkel och billig utrustning	Väderkänslig
Bra dokumentation	Begränsad spatial och temporal upplösning

3.3.6 GB-InSAR

Markbaserad InSAR (Ground Based InSAR, GB-InSAR) är en radarbaserad mätteknik som framförallt används för att mäta horisontella rörelser. Radarpulser skickas ut med en hög frekvens mot det objekt som övervakas. Pulserna reflekteras tillbaka till instrumentet. Tiden det tar för pulserna att nå tillbaka till instrumentet omvandlas till avstånd. Metoden har en räckvidd på upp till 4 km och mäter förändringen i avstånd relativt föregående mätning, med en mätosäkerhet på 0,1 mm. För sättningsmätning innebär detta att instrumentet bäst monteras med så stor infallsvinkel som möjligt mot marken, Figur 3.17. På grund av detta har tekniken framförallt används för mätningar av horisontella rörelser i bergsidor i alpina miljöer samt i dagbrott inom gruvindustrin. Inom Trafikverket finns idag via våra källor ingen erfarenhet i användandet av GB-InSAR.



Figur 3.17 Infallsvinkel måste vara stor om GB-InSAR ska kunna användas för sättningsmätning. (Från Intrieri et al. 2015).

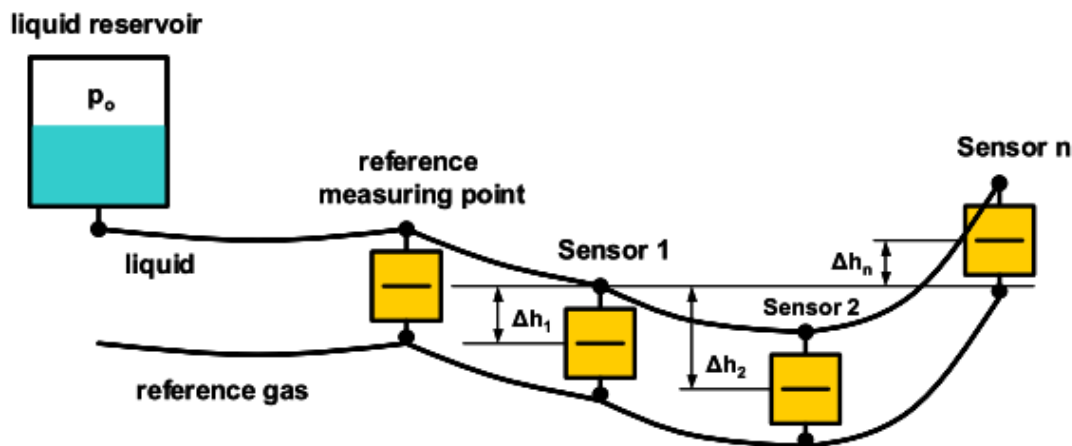
Tekniken har en god yttäckning i de fall man kan få till, en för tekniken, stor infallsvinkel. Den temporala upplösningen är mycket god vid det enskilda mättillfället och man kan i realtid detektera rörelser. Den mer långsiktiga temporala upplösningen är sämre då man måste återetablera utrustningen i fält och identifiera samma objekt som man tidigare träffat. Tekniken är väderokänslig men kräver att samma förutsättningar finns från gång till gång vilket gör tekniken känslig för snötäcke och vegetationsförändringar.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – GB-InSAR

Fördelar	Nackdelar
Lång räckvidd	Mäter siktlinjen ("line of sight" LOS), svår geometri för sättningsmätning (måste räknas om)
Låg relativ mätosäkerhet	Begränsas av snötäcke
Väderokänslig	Begränsas av vegetation

3.3.7 Hydrostatisk nivellering

Ett alternativ till traditionell avvägning som går att automatisera är så kallad hydrostatisk nivellering. Hydrostatisk nivellering bygger på kärl förbundna med rör. Förutsatt att samma lufttryck och temperatur råder i såväl rör som vätska kan höjder avläsas med en mycket liten mätosäkerhet. Tekniken används för automatisk sättningsmätning i broar, industrier och andra konstruktioner. Mätnoggrannheten i systemen är mycket god och kan räknas på delar av millimetern, (GeTec 2015; Meier et al. 2004). Problem uppstår då vätskans temperatur varierar och man måste kyla vätskan för att erhålla en jämn temperatur. Vi har inte hittat någon referens som visar hydrostatisk nivellering i praktiska tillämpningar avseende sättningsmätning kopplat till geoteknik, men den är en intressant teknik att tillämpa i ett större projekt vid sidan av traditionella system.



Figur 3.18 Exempel på ett system för hydrostatisk nivellering. (Från GeTec 2015).

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Hydrostatisk nivellering

Fördelar	Nackdelar
Fasta installationer	Fasta installationer
Mycket liten mätosäkerhet	Slangar och sensorer i områden där tung trafik kan störa/förstöra utrustningen.
Stabila system över tid	
Automatiska avläsningar	

3.4 Geodetisk mätning – Luftburna metoder

3.4.1 Luftburen laserskanning (LIDAR)

Luftburen laserskanning kan utföras med antingen helikoptrar eller flygplan som bärare. Grundplattformen liknar den som används vid terrester laserskanning men räckvidden vid luftburen laserskanning är i regel mycket längre än vid terrestra ändamål. Positionering av plattformen görs med GNSS-teknik tillsammans med en tröghetsplattform som kontinuerligt mäter de accelerations- och rotationsförändringar som påverkar systemet. Luftburen LIDAR ger en mycket god spatial täckning och stora ytor kan täckas under en relativt begränsad tid. En typisk mätosäkerhet man uppnår på väldefinierade hårdgjorda ytor är 2 cm i höjd, men i övrig terräng är mätosäkerheten snarare 10 cm. Precis som vid terrester laserskanning vet man inte vilka objekt som träffas vid skanningstillfället utan man måste extrahera informationen från insamlad data.

Vi ser luftburen laserskanning som lämplig för övergripande sättningsmätning över större områden och med glesa intervall. En nackdel med tekniken är att kostnaden för att få upp en bärare i luften är hög. Tekniken är känslig för såväl väderförhållanden som vegetation. Luftburen laserskanning används i de flesta Trafikverksprojekt för att ta fram projekteringsunderlag. För tillämpningar inom sättningsmätning är erfarenheterna begränsade. Vid skredet i Småröd 2006 då E6:an raserades (Krisinformation.se 2015) använde Trafikverket luftburen laserskanning för dokumentation av skredmassor. I detta fall användes tekniken inte för dokumentation av pågående sättningar utan för att dokumentera omfattningen av det totala skredet.

Tekniken gör det möjligt att identifiera sättningar på ytan mellan geotekniska konstruktioner som kan indikera att det även finns sättningsproblem längre ner i markprofilen.

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – LIDAR

Fördelar	Nackdelar
Yttäckande	Dyr metod
Noggrannhet 20 mm på hårdgjorda ytor	Begränsad temporal upplösning
	Begränsas av vegetation
	Begränsas av väder (snö)

3.4.1 Luftburen fotogrammetri

På samma sätt som vid luftburen laserskanning kan man från luften ta bilder. I detta fall ersätts laserskannern med en kamera. Fotogrammetrin har samma egenskaper som luftburen laserskanning då det gäller spatial och temporal täckning, alltså goda spatiala egenskaper, men kostnaden att få upp kameran i luften begränsar dess temporala upplösning. Efterbearbetningsprocessen kräver en del manuellt arbete även om processen att bestämma koordinater från bilder till stor del är automatiserad. Noggrannheten i höjd kan approximeras till 1,5 ggr pixelavståndet på marken, det vill säga med ett pixelavstånd på 4 cm erhålls en osäkerhet i höjd på 6 cm. Metoden används av Trafikverket för att följa sättningar i svåråtkomliga områden men har idag en begränsad användning inom sättningsmätning.

Framtida tillämpningar med obemannade bärare (UAV) ger en möjlighet att följa sättningar från luften. En del utvecklingsprojekt inom området har av Trafikverket initierats vid högskolan i Gävle (Mårtensson & Reshetyuk 2015).

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – Luftburen fotogrammetri

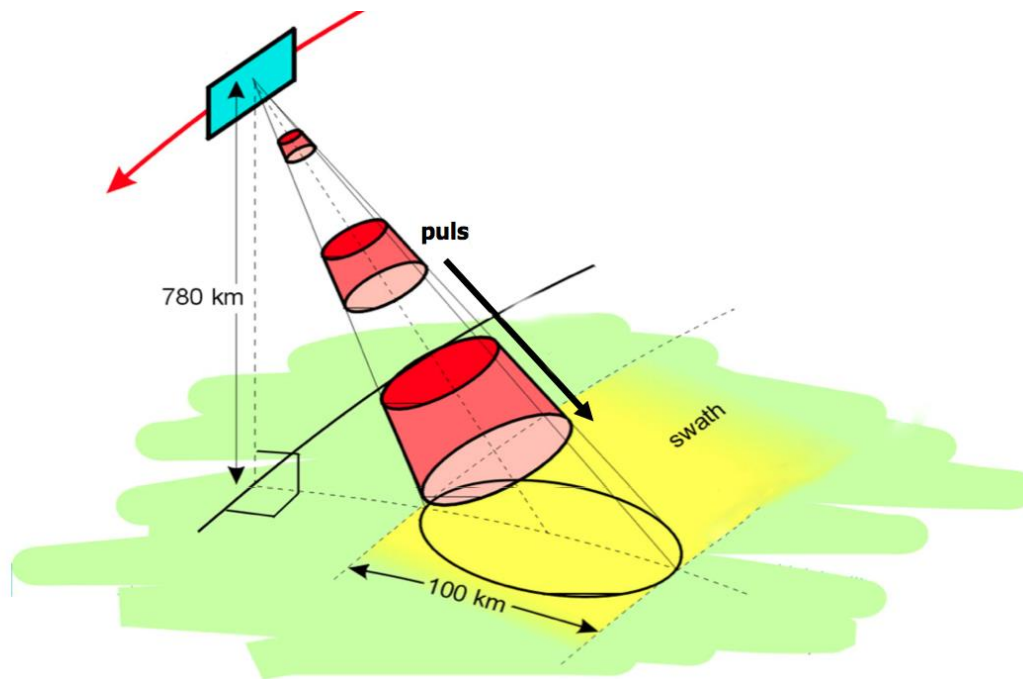
Fördelar	Nackdelar
Yttäckande	Dyr metod
Sämre i höjd än i plan	Begränsad temporal upplösning
	Begränsas av vegetation
	Begränsas av väder (snö)

3.5 Geodetiska metoder – Fjärranalys

3.5.1 DInSAR

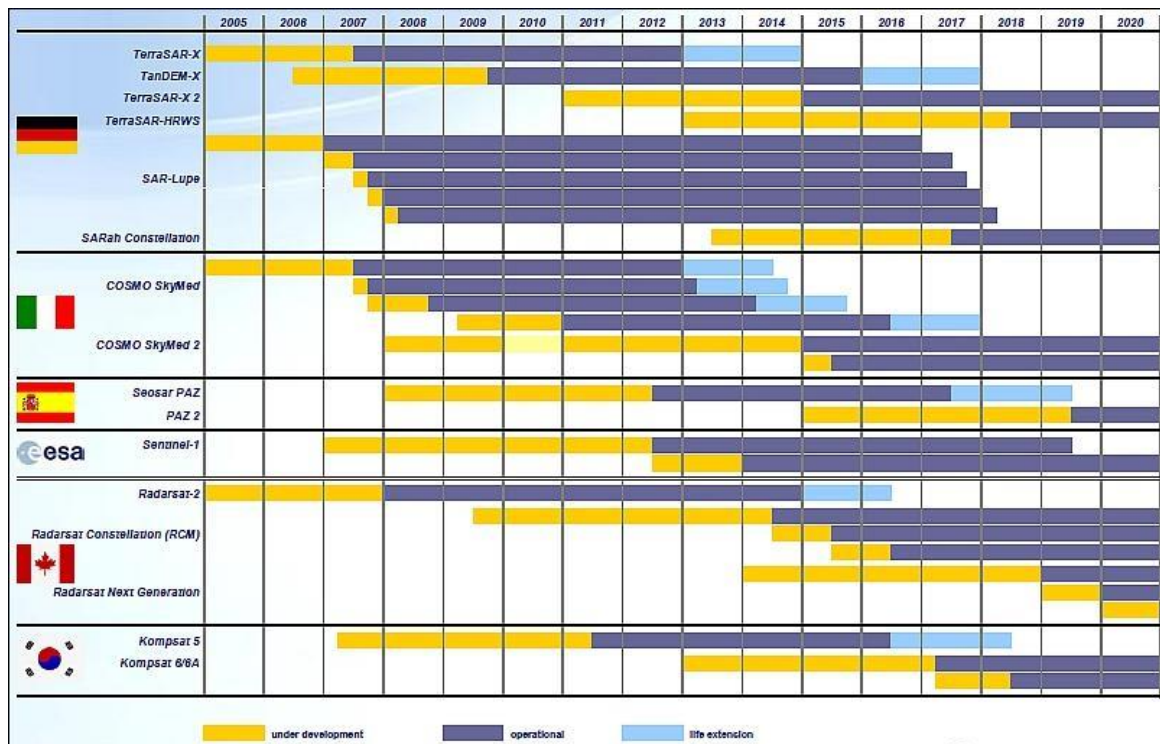
DInSAR (Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) är en satellitbaserad teknik som ger en mycket bra spatial upplösning. Tekniken bygger på en kontinuerlig ström av radarpulser som sänds mot marken från satelliter i omloppsbana kring jorden. Radarpulserna reflekteras då de når marken på alla tänkbara objekt, en del reflekteras bort från satelliten, en del absorberas av vegetation och eller andra icke reflektiva objekt och en del reflekteras tillbaka mot satelliten. Man vet inte på förhand vad signalen kommer att reflekteras mot utan det är det objekt som har bäst reflektiva egenskaper som signalen studsar på. Oftast utgörs dessa av hustak, stenar, berg och liknande objekt. Returnerad signal registreras i satelliterna av sensorer och tillgängliggörs användarna i form av bilder. Bilderna representerar uppmätt intensitet och fasvinkel på inkommande signal. Genom att upprepa proceduren vid flera olika tillfällen kan man jämföra fasskillnaden mellan två eller flera passager som omvandlas till avstånd. Det är således inte avståndet till satellit som mäts utan förändringar mellan två eller flera bilder. Den maximala sättningen mellan två bilder uppgår till halva våglängden för radarsignalen. Dessa varierar men för en vanlig signal med en våglängd på 6 cm ger en största sättning mellan två satellitpassager på 3 cm. Detta måste tas i beaktan då tekniken väljs.

DInSAR är en ”line of sight”-teknik (LOS) och de rörelseförändringar som mäts är längs siktlinjen mellan satelliten och de reflekterande objekten på marken. För att bestämma vertikala sättningar krävs en omräkning av LOS till i en vertikal och horisontell komponent. Detta kan endast göras under antagandet att rörelserna i horisontalldet är försumbara.



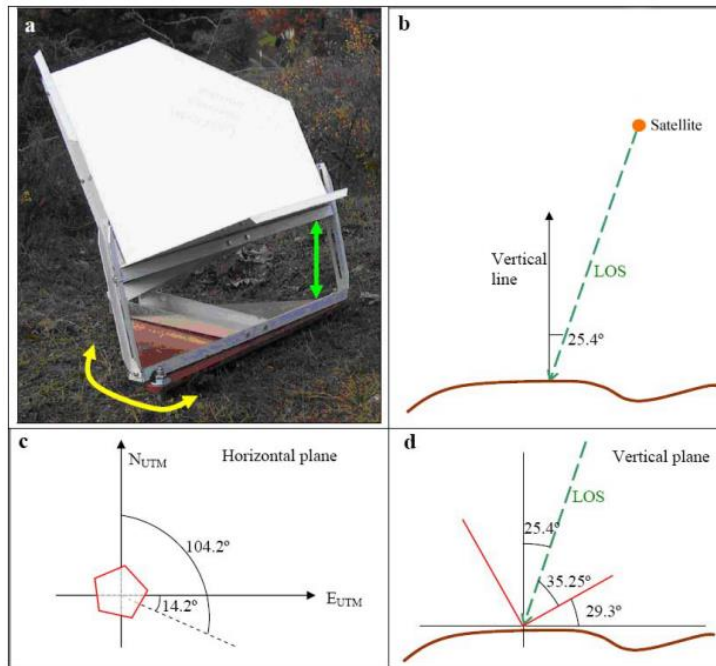
Figur 3.19 Princip figur som visar hur radarpulser skickas mot jorden från en InSAR-satellit. (Från SkyGeo 2015).

Ytan som täcks av en bild och upplösningen (pixelstorlek på marken) varierar beroende på det satellitsystem som används. I Figur 3.20 nedan framgår olika tillgängliga satellitsystem och dess livslängd.



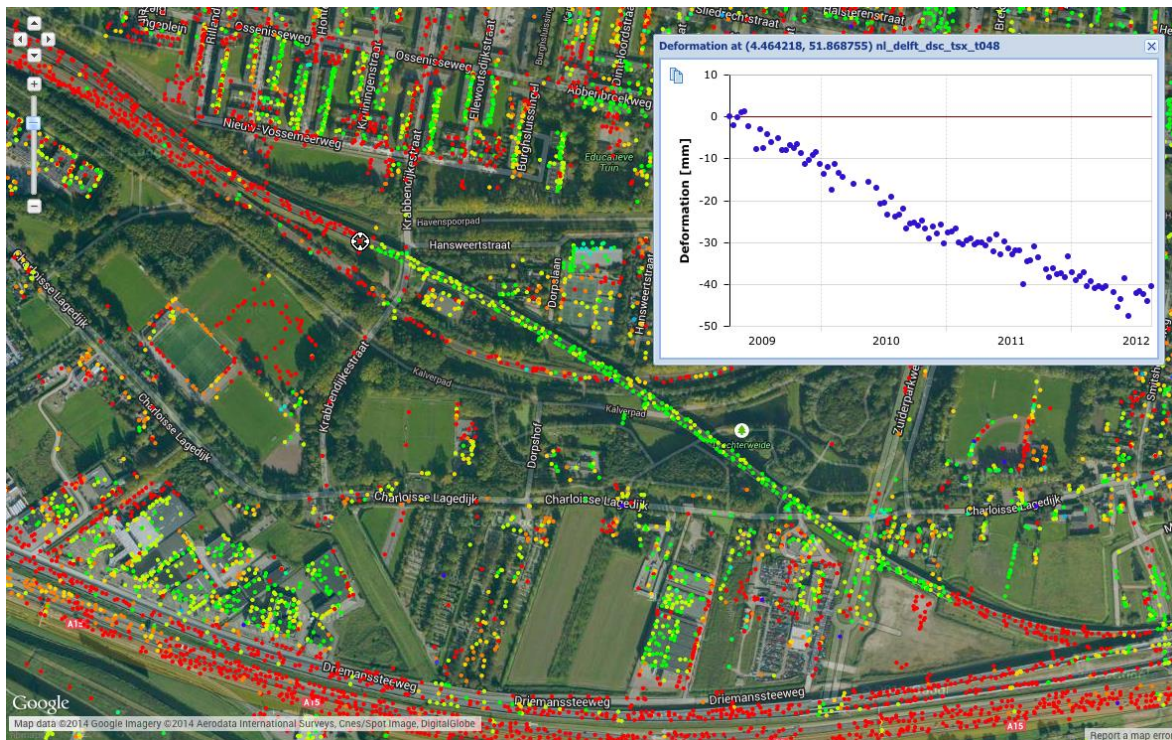
Figur 3.20 Tillgängliga satellitradarsystem.

Mätosäkerheten för siktlinjen (LOS) är cirka 5 mm för de satelliter som har den högsta upplösningen som Airbus TerraSat-X. Genom att kombinera information från en serie bilder kan sättningsrörelser för objekt med goda reflektiva egenskaper detekteras med en hastighet på < 1 mm/år vilket gör tekniken attraktiv för att följa de övergripande sättningarna som pågår över större områden. Tekniken kräver hårdgjorda objekt som reflekterar signalen. I områden där det inte finns sådana objekt kan reflektorer installeras, designade för och utplacerade för att reflektera inkommande signaler, Figur 3.21.



Figur 3.21 Figur a visar exempel på reflektorer (corner reflectors) som kan användas för att få en tydlig reflektion från något specifikt objekt. Reflektorerna riktas mot satellit så man optimerar reflektionen, vilket framgår av bilderna b, c och d. (Från Crosetto et al. 2013).

Ett typiskt exempel på hur resultatet från ett DInSAR projekt ser ut framgår av Figur 3.22, där varje prick i bilden motsvarar ett objekt där sättningsmätning pågår. Stjärnan i bilden visar en markör som placeras över en punkt, dess rörelsemönster framgår i diagrammet i det övre högra hörnet av bilden. Trafikverket har nyligen valt tekniken för uppföljning av bakgrundssättningar i projekt Västlänken för just detta ändamål.



Figur 3.22 Exempel på hur resultatet från ett DInSAR projekt kan se ut. Varje prick i bilden motsvarar en punkt i vilken sättningsuppföljning pågår. (Från SkyGeo 2015).

Fördelar respektive nackdelar vid uppföljning av vägar och järnvägar – DInSAR

Fördelar	Nackdelar
Yttäckande	Begränsad temporal upplösning
Långtidsrörelser	Upplösningen gör att sättningsarna inte får vara för stora, maximalt halva våglängden
Går att automatisera till stor del	Vet inte var man träffar men mest troligt hustak etc.
Låg mätosäkerhet	LOS – måste räknas om till vertikalt mått
	Relativa rörelser mäts upp

4. Analys av användningsområden

Skilda byggprojekt kräver olika metoder för kontrollmätning av sättningar. Att följa sättningsförloppet hos en väg- eller järnvägsbank innebär andra frågeställningar än till exempel vid kontroll av omgivningspåverkan. På motsvarande sätt som vid utvärdering av systemens funktion och prestanda kan det därför vara meningsfullt att analysera metodernas tillämpning i olika anläggningssammanhang. Givetvis finns alltid möjlighet att anpassa systemen och i varje byggprojekt finns också speciella frågeställningar som kan kräva speciella kontrollmetoder. En grov översikt över de studerade systemens tillämpning är sammanställda i Tabell 4.1:

Tabell 4.1 Tillämpningsområden för kontrollsystem för sättningsmätning.

Översikt av tillämpning för kontrollsystem för sättningsmätningar								
	Klarlägga bakgrunds-sättningar	Hitta karakteristiska uppföljnings-/provtagningspunkter	Kalibrering av beräkningsmetoder	Kontrollera skyddsobjekt	Kontrollera förväntat beteende	Styra process (Aktiv design)	Kontroll av sättningar som underlag för larm	Erfarenhetsåterföring
Markpegel			X	X	X	X	X	X
Skruppegel					X			X
Horisontalslang					X			X
Bålgslang			X		X	X	X	
Magnetsättningsmätare			X		X	X	X	X
Fiberoptik			X	X	X	X	X	
ASAT					X			X
EMU-spolar			X		X		X	
SAAF				X		X	X	X
Avvägning				X		X	X	X
Trig. Mätn.				X		X	X	X
GNSS				X		X	X	X
Lidar-terrest				X		X	X	
GBInSAR				X		X	X	
Lidar-flyg	X	X						X
Fotogrammetri	X	X						X
DInSAR - satellit	X	X		X	X		X	X

Syftet med sättningsmätningarna varierar mellan olika projekt men innefattar vanligen dels att följa en konstruktions funktion och kvalitet och dels att verifiera geomodeller samt utvärdera bakgrundsrorelser. Bakgrundsrorelserna skattas med hjälp av regressionsanalys för att ta fram trendlinjer. Frågan är hur bra indata för dessa analyser behöver vara för att fånga trenden. Frågan är aktuell då noggrannhet direkt är kostnadsbärande vid geodetiska mätningar.

Ingen av de geodetiska metoderna går att förkasta till förmån för någon annan utan ska ses som metoder som kompletterar varandra i olika tillämpningar. En ny generation av GNSS-mottagare är på väg. Dessa är billiga och små och kommer möjliggöra montering på plats vid sättningsmätningar.

DInSAR-tekniken visar på många användningsområden både före och under pågående projekt. Dock sker mätningarna med ett glest intervall, vilket i och för sig lämpar sig bäst för långsamma sättningar. Kombinationen med andra mätmetoder bör utredas vidare.

Pågående regionala bakgrundssättningar ger speciella förutsättningar på många platser i landet. Denna information hämtas lämpligen från tidigare avvägningar i området samt genom att använda DInSAR teknik i de fall data finns tillgängligt. Flera olika geodetiska mätmetoder bör användas för att verifiera resultatet från desamma. En särskild frågeställning är pågående konsolideringssättningar (på grund av landhöjning) i områden med stora lerdjup.

Noggrannheten i de geotekniska systemen styrs både av precisionen i avvägningen och av osäkerheter i de geotekniska installationerna. Osäkerheten i hur väl till exempel en bälgslang följer de verkliga sättningarna på olika djup måste sättas i relation till osäkerheten i mätavläsningen.

5. Utvecklingspotential och förslag till pilotstudie

5.1 Utvecklingspotential

Det finns idag inget enskilt kontrollsystem som kan täcka alla behov i ett vanligt väg- eller järnvägsprojekt. Det handlar istället om att kombinera flera olika mätsystem. Vi ser för framtiden en stor potential i att utveckla kombinerade system med samordnad insamling och analys av mätdata.

Vi bedömer också att det finns utrymme för utveckling av nya, framförallt geotekniska metoder, där sättningsförloppet mot djupet i en markprofil kan registreras automatiskt och på avstånd. Befintliga geotekniska system för mätning i djupare marklager är alla behäftade med svagheter och begränsningar. Mot den bakgrunden ser vi också att SAAF samt fiberoptiska tillämpningar bör testas och utvärderas för sättningsmätning på olika nivåer i markprofilen.

Automatiseringen av sättningsmätning är intressant att gå vidare med. Det finns automatiska geodetiska system men det är oklart om det finns automatiserade geotekniska system. Att utveckla system för automatisk distansavvägning av till exempel skruvpeglar är intressant liksom fortsatt teknikutveckling av till exempel magnetsättningsmätare eller andra former av vertikal registrering.

En ny generation av GNSS-mottagare är på väg. Dessa är billiga och små och kommer möjliggöra montering på plats vid sättningsmätningar.

Behovet av mättningsnoggrannhet bör utredas vidare för att se hur noggrant man behöver mäta i olika situationer. Vissa system har mättnoggrannhet på mindre än 1 mm, vilket ska sättas i relation till jordrörelser, till följd av bland annat temperaturväxlingar och/eller fuktighetsskillnader som kan vara större än så (över långa avstånd kanske också tid-jord hävning).

DInSAR med reflektorer bör utredas vidare och hur dessa kan användas för att stärka avvagningsnäten i områden där avståndet till fasta höjdfixar är stort.

Vidare ur ett geodetiskt perspektiv vore det av största intresse att lyfta frågan kring optimal design för att se hur man kan optimera kombinationen av mätningar för att nå ett visst resultat.

5.2 Förslag till pilotprojekt

Diskussioner har förts med Trafikverket för upprättande av pilotstudie kopplad till Västlänken och/eller väg och järnväg längs Göta älvdalen. I projektet har vi fastnat för utprovning/försök av tre samverkande och kompletterande system; InSAR-mätning för värdering av bakgrundssättningar; SAAF för mätning av sättningar på olika djup över ett större område (med exempelvis en korsande väg- eller järnvägsbank) samt markpegel med automatisk mätning för verifiering av ytliga marksättningar. En viktig del i detta är att jämföra och utvärdera data från ovan föreslagna områden med resultaten från bälgslangsmätningar som redan utförs idag i både Göta älvdalen och vid Västlänken.

Beskrivning av ”motiv” för sättningsuppföljning för pilotområde Västlänken:

- Risken för grundvattensänkning gör att en metod för översiktlig sättningsmätning är nödvändig.
- Ett samarbete finns med stadsbyggnadskontoret i Göteborg för utbyte av data.
- Slutprognosen avseende antalet punkter som kommer ingå för sättningsmätning bedöms vara cirka 3000 stycken (för närvarande avvägs cirka 400 dubbar årligen).
- Sättningar mäts också i 8 bälgslangar.
- Ett centralt datalagringsystem håller på att byggas upp för projektet.
- Validering av data innan det kommer in i systemet är viktigt.

Kostnaderna för de föreslagna systemen är relativt höga, cirka 1000 kkr/år för satellitmätning och cirka 700 kkr för installation och mätning med SAAF. Idéskissen förutsätter fortsatt planering för att hitta relevanta användningsområden för installation och mätning. En stor fördel med Västlänken är i detta sammanhang att det redan finns InSAR data där. En mer noggrann utvärdering av dessa InSAR-data skulle kunna ge god input för analys av övriga mätsystem. En möjlig utveckling kan vara att Trafikverket genom InSAR-mätningar successivt skaffar sig kunskap om den regionala sättningsutvecklingen inom känsliga områden i landet. DInSAR mätning för Västlänken har handlats upp för en period av 3 år med option på ytterligare 3 år. Området sträcker sig upp mot Kungälv och det behöver undersökas ytterligare om ett pilotprojekt kan motiveras inom täckningsområdet, vilket i så fall skulle innebära avsevärt lägre kostnader genom att befintliga InSAR data kunde utnyttjas.

Referenser

Abdoun, T & Bennett, V 2008, 'A new wireless MEMS-based system for real-time deformation monitoring', *Geotechnical News*, vol. 26, no. 1, pp. 36-40.

Andersson, M 2012, *Kompressionsegenskaper hos sulfidjordar. En fält- och laboratoriestudie av provbankar*. Licentiatuppsats, Luleå tekniska universitet, Geoteknologi.

Barendse, M 2008, 'Field evaluation of a MEMS-based, real-time deformation monitoring system', *Geotechnical News*, vol. 26, no. 1, pp. 41-44.

Becker, JM, Lithén, T & Nordquist, A 1988, *Experience of motorized trigonometric levelling (MTL) – a comparison with other techniques*. Lantmäteriverket, LMV-Rapport 1988:23.

Benoit, L, Thom, C & Martin, O 2014 'Landslide monitoring using Geocubes, a wireless network of low-cost GPS receivers', *Journal of Applied Geodesy*, vol. 8, no. 2, pp. 119-128.

Cautus Geo AS 2015

Tillgänglig från: < <https://www.youtube.com/watch?v=fBjBsIs2Syg&feature=youtu.be> >

Cautus Geo AS 2013, *Teknologioversikt – monitorering av Stora Helvetet*. Cautus Geo AS.

Crosetto, M, Gili, JA, Monserrat, O, Cuevas-Gonzalez, M, Corominas, J & Serral, D 2013, 'Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors', *National Hazards Earth Systems Science*, vol. 13, no. 4, pp. 923-933.

ESRI 2004

Tillgänglig från: < <http://www.esri.com/news/arcnews/winter0405articles/more-accurate.html> >

GeTec 2015

Tillgänglig från < <http://www.getec-ac.de/de/messtechnik/geomesstechnik/schlauchwaage.html> >

Habel, WR & Krebber, K 2011 'Fiber-Optic sensor applications in civil and geotechnical engineering', *Photonic Sensors*, vol. 1, no. 3, pp. 268-280.

Intrieri, E, Gigli, G, Nocentini, M, Lombardi, L, Mugnai, F, Fidolini, F & Casagli, N 2015, 'Sinkhole monitoring and early warning: An experimental and successful GB-InSAR application', *Geomorphology*, vol. 241, pp. 304-314.

Inaudi, D & Glisic, B 2007a, 'Overview of fiber optic sensing technologies for geotechnical instrumentation and monitoring', *Geotechnical News*, vol. 25, no. 3, pp. 27-31.

Inaudi, D & Glisic, B 2007b, 'Distributed fiber optics sensors: Novel tools for the monitoring of large structures', *Geotechnical News*, vol. 25, no. 3, pp. 31-35.

Institut für Kartographie und Geoinformatik, 2015

Tillgänglig från: < <http://www.ikg.uni-hannover.de/index.php?id=index> >

Iten, M, Hauswirth, D, Fischli, F & Puzrin, AM 2012, 'Distributed FIBRE-OPTIC sensors in geotechnical engineering monitoring', *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Bulletin*, vol. 6, no. 5, pp. 32-44.

Janoo, V, Irwin, L, Knuth, K, Dawson, A & Eaton, R 1999, 'Use of inductive coils to measure dynamic and permanent pavements strains' in *Accelerated pavement testing Conference*, Reno, Nevada, USA.

Krisinformation 2015

Tillgänglig från < <https://www.krisinformation.se/handelser-och-storningar/2006/skredet-i-munkedal> > [2015-08-24].

Lantmäteriet 2015

Tillgänglig från: < <http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Absolut-och-relativ-positionering/> >

Leica Geosystems 2015

Tillgänglig från:

<http://w3.leicageosystems.com/downloads123/zz/accessory/accessories/brochures/Leica%20Original%20Accessories%20BRO_en.pdf >

Measurand

Tillgänglig från: < http://www.measurandgeotechnical.com/examples_video.html >

Meier, E, Wei, F, Rivkin, L, Wrulich, A, Zelenika, S, Ingensand, H, Haberecht, M & Akeret, F 2004, 'Long-term results of the hydrostatic levelling system at the Swiss light source (SLS)', in European Organization for Nuclear Research, CERN, *8th International Workshop on accelerator Alignment, IWAA*, Geneva, 4-7 October.

Mohamad, H, Soga, K, Bennett, PJ, Mair, RJ & Lim, CS 2012, 'Monitoring twin tunnel interactions using distributed optical fiber strain instruments' *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, no. 8, pp. 957-967.

Mårtensson, SG & Reshetyuk, Y 2015, *Noggrann och kostnadseffektiv uppdatering av DTM med UAS för BIM*. Trafikverket, Publikation 2015:030.

Möller, B & Åhnberg, H 1992, *Övervakningssystem – Släntbeteende – Skredinitiering. Resultat från fullskaleförsök i Norrköping*. Statens geotekniska institut, SGI, Rapport 41, Linköping.

Nöther, N, Glözl, R, Vollmert, L, Ehrenberg, H, Weisemann, U, Grossmann, S & Oehmichen, R 2012, 'Displacement monitoring in geotechnical applications using fiber sensors in geosynthetics', in Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung E.V., DGZfP, *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, We.2.C.4.

Oscarsson, E 2011, 'Evaluation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide model for permanent deformations in asphalt concrete', *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 12, no. 11, pp. 1-12.

Rimstedt, M 2006, *Uppföljning av bärighet och deformationsutveckling av terminalytor vid inventering och nybyggnad i Göteborgs Hamn*. Examensarbete 2006:31, Chalmers tekniska högskola, Institutionen för Bygg- och miljöteknik, GEO, Geologi och geoteknik.

SkyGeo 2015

Tillgänglig från: < <http://skygeo.com/nl/referenties/> >

Sundblad, J & Widén P 2007, *Bärighet på väg via förbättrad packning – fullskaleförsök med lättklinker som underbyggnad*. Examensarbete 2007:33, Chalmers tekniska högskola, Institutionen för Bygg- och miljöteknik, GEO, Geologi och geoteknik.

Wiman, LG 2010, *Accelererad provning av vägkonstruktioner, Referensöverbyggnad enligt ATB väg*. Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI, Rapport 628.

Muntlig kommunikation:

- Anders Hansson, Trafikverket
- Per-Evert Bengtsson, SGI
- BIG VIP-möte 2015-10-21



Statens geotekniska institut

Postadress: 581 93 Linköping

Tel: 013-20 18 00

E-post: sgi@swedgeo.se

www.swedgeo.se
