

ANALYS AV KONVERGENSMÄTNINGAR

Rikard Gothäll

ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION
STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING

ANALYS AV KONVERGENSMÄTNINGAR

Analysis of convergence in underground excavations

Rikard Gothäll
WSP

BeFo Rapport 109
Stockholm 2011
ISSN 1104 – 1773
ISRN BEFO-R—109—SE

Förord

Analys av konvergensmätningar är ett bergmekaniskt verktyg. Föreliggande projekt har analyserat hur mätdata behandlas efter själva mätningarna och presenterar förslag på hur denna process kan förbättras.

Konvergensmätningar utförs för att säkerställa att bergets respons inte avviker för mycket från det förväntade. I bra berg där rörelserna är små kan mätosäkerheten vara större än de faktiska bergrörelserna. En anledning till osäkerheter är att ömtåliga mätprismor monteras ner mellan mätningar.

Spänningsfältet kring en tunnel approximeras ofta med hjälp av GRC (Ground Reaction Curve). Konvergensmätningar syftar ofta till att bekräfta att aktuella parametrar ligger inom antagna ramar. Föreliggande projekt presenterar en metodik som kan innebära att konvergensmätningar kan underlättas och bli mer rättvisande. Mätdata i projektet har inhämtats från undermarksprojekt i Stockholmsområdet. Utvecklas mättekniken med laser kan konvergensmätningar bli vanligare och säkrare. Projektet har utförts av Teknologie doktor Rikard Gothäll på WSP i Stockholm.

Stockholm i augusti 2011

Mikael Hellsten

Sammanfattning

Deformationsmätningar i tunnlar är inte elementära att varken utföra, analysera eller redovisa. I denna rapport beskrivs därför ett tillvägagångssätt för projektörer för att underlätta analysen och redovisningen av konvergensdata. Metoden är särskilt framtagen för att hantera mätdata som är behäftat med olika typer av mätfel som försvårar analysen av laserbaserade mätningar, speciellt om deformationerna är små i förhållande till mätstörningarna. Metoden illustreras med mätningar från tre stycken mätserier från undermarksanläggningar i Stockholmsområdet och med en exempelimplementation i programspråket Pylab.

Abstract

Deformation measurements in hard rock tunnels are not elementary to perform, to analyse or to illustrate. In this report, an engineering method is described with the goal to facilitate the analysis and illustration of rock tunnel convergence. The method is specially design to deal with noisy data that otherwise can be problematic to analyse, especially for tunnels in competent rock where the signal to noise ratio may be very small. The method has been illustrated with measurements from three tunnels in the Stockholm area and a reference implementation in the programming language Pylab.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Bergrörelser vid tunnelbygge	3
2.1	Ground Reaction Curve	3
2.2	Förväntade resultat	7
2.3	Mätmetod	7
2.4	Mätpunkternas placering	7
2.5	Att bestämma normalriktningen för en mätpunkt	8
2.6	Att bestämma tvärsnittets position från mätpunkternas placering	10
2.7	Teckenkonvention	11
2.8	Felkällor	11
3	Algoritmbeskrivning	15
3.1	Implementation	15
3.2	0-mätningen	16
3.3	Definiera nytt origo	16
3.4	Beräkna normalvektorn till mätsektionen	16
3.5	Ta fram mätordningen	17
4	Tolkning av resultat	19
4.1	Illustration av konvergens	19
4.2	Illustration av mätpunkternas rörelse	19
4.3	Illustration av den totala konvergens	20
5	Exempel på mätningar	21
6	Slutsatser	29
A	Exempelimplementation	31

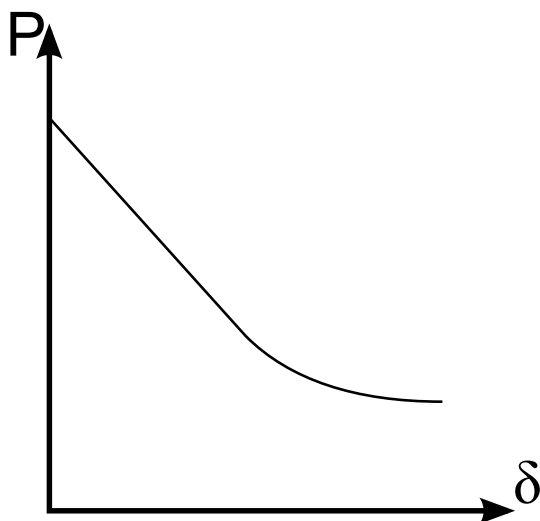
1 Inledning

Vid projektering av undermarksanläggningar så antas det ofta att berget har ett visst naturligt inspänningstillstånd men detta antagande är ofta kostsamt att verifiera genom direkta bergsspänningsmätningar. I de fall där man tillämpar någon form av aktiv design vid produktionen av undermarksutrymmet så förefaller det lämpligt att försöka undersöka spänningstillståndet närmare.

Ett alternativt sätt att bekräfta att bergets tillstånd och beteende ligger inom de projekterade ramarna är att utföra konvergensmätningar. Rörelserna i berget kring t.ex. en tunnel kommer att vara en indikation på att spänningarna och bergkvalitén inte avviker alltför mycket från vad som är förväntat.

Konvergensmätningar utförs frekvent vid lite mer komplicerade tunnelbyggen, men redovisningen och tolkningen av mätningarna varierar lite från projekt till projekt. I denna rapport redovisas en metod som utarbetats på WSP och som förhoppningsvis kan ligga till grund för en mer enhetlig redovisning och tolkning i branschen som helhet. Visst fokus har också lagts vid själva mätdatabehandlingen och hur feluppskattningen kan gå till. Det har nämligen visat sig att mätfelet under vissa förhållanden kan vara större än rörelserna man försöker mäta upp.

I denna rapport har mätdata hämtats från ett par aktuella undermarksprojekt i Stockholmsområdet. Samtliga projekt har varit ytligt förlagda och med för området typisk bergkvalitet. Det har inneburit att bergrörelserna har varit små och svåra att tolka på sedvanligt sätt utifrån de mätningar som entreprenörerna har levererat.



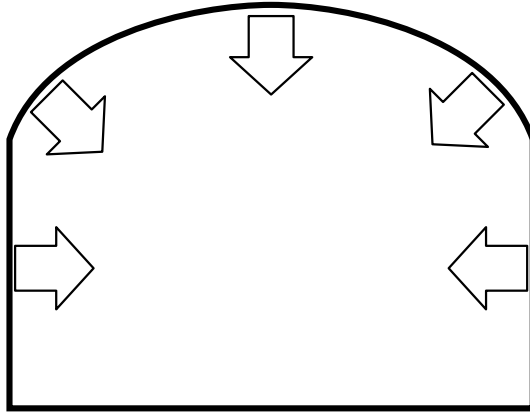
Figur 1: *Ground Reaction Curve, GRC, beskriver det mothållande tryck, P , som krävs för att begränsa konvergensen till en viss deformation, d. P ökar med ökande bergspänningar, varför deformationerna, givet en viss förstärkning, ger en indikation på spänningsnivåerna.*

2 Bergrörelser vid tunnelbygge

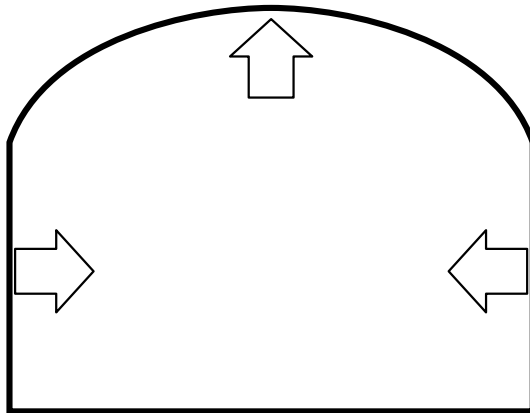
2.1 Ground Reaction Curve

Som approximation för spänningsfältet kring en tunnel används ofta ground reaction curve, GRC. GRC ger deformationerna för ett runt hålrum i ett isotropiskt spänningsfält och med ett plant töjningstillstånd. Det är naturligtvis väldigt få tunnlar som uppfyller kraven, men för ett välvt tak i en rak tunnel med god bergtäckning så ger det en god fingervisning om hur stora deformationer man bör förvänta sig. Deformationerna är i sin tur ett mått på spänningarna och bergmassans mekaniska egenskaper. Att mäta konvergensen i tunneln har ofta som syfte att bekräfta att de parametrarna ligger inom de ramar man antagit *a priori*.

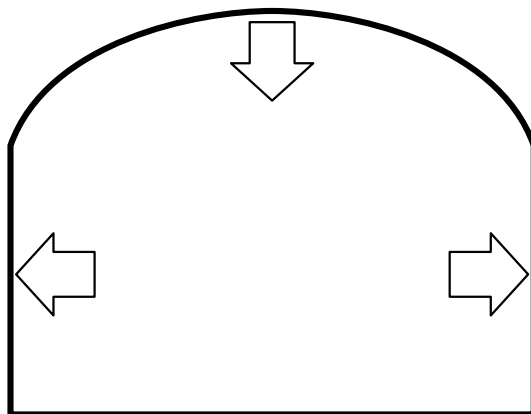
I strikt mening är konvergensen enligt GRC också begränsad till rent rotations-symmetriska deformationer. Det är dock möjligt att utvidga begreppet konvergens till att inkludera alla former av bergdeformationer kring tunnlar av olika form och i berg med anisotropiska egenskaper med hjälp av några elementära observationer. Den första är att för GRC gäller att alla deformationer är strikt



Figur 2: Förväntad deformation för en tunnel på stort djup.



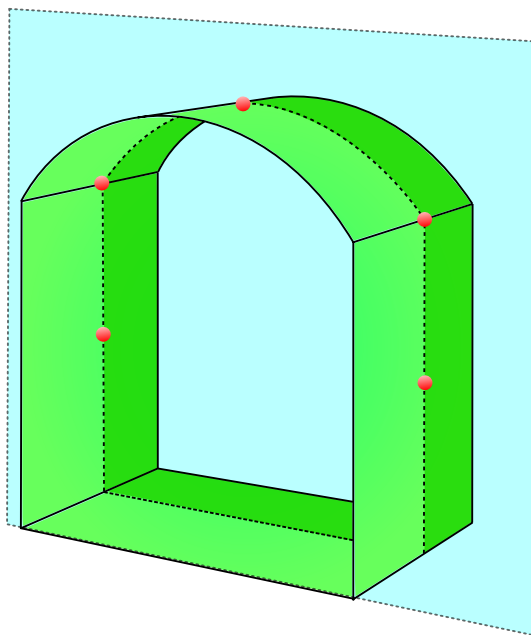
Figur 3: Förväntad deformation för en ytlig tunnel vid höga horisontalspänningar



Figur 4: Förväntade deformationer för en ytlig tunnel utan horisontell inspänning.

radiella, en följd av rotationssymmetrin hos problemet. För tunnlar av annan form kan man utvidga konvergensbegreppet så att det för alla tunnlar med konvex form gäller att bergdeformationer riktade i en ytas normalriktning är att klassa som konvergens. Om alla ytor rör sig lika mycket och åt samma håll så blir det uppenbart att det är identiskt med konvergens hos en rotationssymmetrisk tunnel då deformationen är en renodlad skalning. Om deformationerna däremot är asymmetriska uppstår en rotationskomponent i ytornas rörelse. För alla rimliga fall av små deformationer blir denna komponent väldigt liten, vilket är positivt då varken laserbaserade eller extensiometerbaserade mätmetoder förmår uppmäta rotationsrörelser. Med denna definition bör man dock skilja på elastoplastiska deformationer i bergmassan och rena blockrörelser. I praktiken är det dock omöjligt att utifrån mätningarna särskilja en blockrörelse i t.ex. taktet från konvergens då mätningarna oftast bara mäter translationsrörelser hos ett litet antal prismor eller dubb. Om mätnoggrannheten hos laserskanningar eller fotogrammetriska inmätningar blir tillräckligt bra kan det bli möjligt att upptäcka och särskilja andra typer av bergdeformationer.

Rörelsen i varje mätpunkt kan delas upp i tre translationskomponenter orienterade ortogonalt mot varandra med den primära riktningen riktad i den inmätta ytans normalriktning. Det är bara rörelsen i normalriktningen som är av intresse för analysen av bergdeformationerna kring tunneln och i idealfallet skulle rörelsen i de andra riktningarna vara noll. I praktiken så kommer mätningarna ge utslag i alla riktningar. Detta ger att rörelserna i de riktningarna kommer ge ett viktigt informationstillskott ang. kvalitén på mätningarnas utförande. Att bestämma normalriktningen för bergytan, när mätningen enbart består av ett



Figur 5: En schematisk bild över en tunnelsektion med fem mätpunkter i samma plan.

litet antal punkter längs konturen hör dock inte till elementa. Det är inte heller säkert att den teoretiska konturen har en sådan form att en renodlad radiell konvergens enligt GRC kommer vara riktad i konturens normalriktning. Den faktiska konturen kan också vara så beskaffad att en strikt normalriktning inte är meningsfull att definiera. Det gäller därför att approximera normalriktningen med viss omsorg, och på ett sådant sätt att konvergensmätningar från olika sektioner går att jämföra med varandra på ett relevant sätt. En annan aspekt att beakta är att teorin för GRC ger deformationen som andel av radien. För absoluta mått, speciellt för icke-cirkulära geometrier, gäller det att skilja på om deformationen är uppmätt över tunnelns hela spann (motsvarande diameter) eller om det är en absolut förändring av tunnelns ekvivalenta radie man avser. Eftersom teorin för GRC använder radie som parameter och en radiell deformation motsvarar den faktiska rörelsen hos en enskild mätpunkt är det lämpligast att försöka relatera absolutvärden på konvergens till radien, snarare än berggrummets spännvidd. Uttrycket "6 mm konvergens" bör avse att varje enskild mätpunkt rört sig c:a 6 mm inåt tunnelns mitt, och att spännvidden minskat runt 12 mm.

2.2 Förväntade resultat

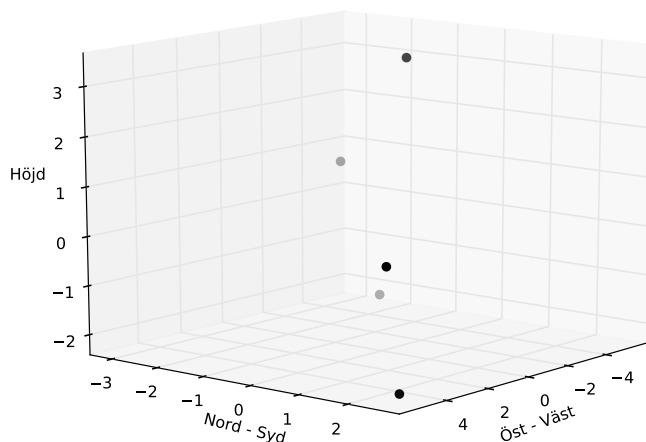
En konvergensmätning som inte är automatiserad är en arbetsintensiv, och därför kostsam, mätning som inte utförs om inte resultatet också kan vara av stort värde för projektet. Följaktligen finns det en förväntansbild kopplad till mätningarna och det är därför relevant att utforma presentationen så att man kan bekräfta eller vederlägga den förväntansbilden. Är tunneln ytlig är det sannolikt stor skillnad mellan horisontal och vertikalspänningarna, vilket kommer visa sig i hur bergytan rör sig. Förmodligen är det då existensen av en valvbildande horisontalspänning som är det man vill bekräfta. Är det en djupare tunnel kommer storleken på konvergensen att vara av vikt för när man avser att sätta in permanent bergförstärkning. En tunnel i varierande geologi kommer sannolikt att ha en konvergens som varierar med bergmassan.

2.3 Mätmetod

Konvergensmätningar kan utföras på många sätt, det vanligaste är dock att ett antal, oftast fem, prismor sätts upp längs konturen i ett tvärsnitt. Genom att mäta positionen för dessa prismor med laser fås tunnelkonturens relativa position och denna kan sedan jämföras med nollmätningen över tiden. Med en laserbaserad inmätning mäter man positionen hos mätpunkterna och rörelsen blir skillnaden i position. Detta ger emellertid upphov till ett antal olika felkällor vars bidrag till rörelsen gör att försöka uppskatta.

2.4 Mätpunkternas placering

Den vanligaste konfigurationen för en hästskeformad tunnel är att det sitter fem mätpunkter utplacerade på väggar, anfang och i tak. Andra antal kan också förekomma men gemensamt är att mätpunkterna sitter approximativt symmetriskt, med väggmonterade punkter på ungefär samma höjd och takpunkten i centrum av taket, vilket ofta är den högsta punkten på valvet. Av praktiska skäl brukar det inte sitta mätpunkter på golvet. En symmetrisk och jämn placering av mätpunkterna har många fördelar som gör att dra nytta av i analysen. Den främsta är dock att en spegelsymmetrisk placering av mätpunkterna garanterar att punkternas gemensamma tyngdpunkt hamnar på tunnelns mittlinje i det närmaste rakt under mätpunkten i taket. Även om mätpunkternas placering är projekterad i detalj så är det i praktiken omöjligt att få dem att sitta helt symmetriskt och samma plan. Algoritmen som beskrivs i denna rapport kompenserar för de fel som kan uppstå när mätpunkternas position i djupled avviker

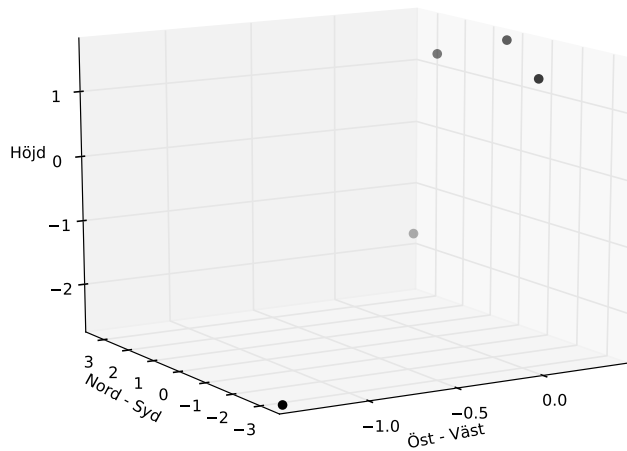


Figur 6: *Ett exempel på en lyckad utplacering av mätprisman. Punkterna, som representerar mätprismor, sitter väldigt nära samma tvärsnitt.*

från det tänkta planet. Avvikelser i symmetri tas också hänsyn till, men alltför stora avvikelser från en spegelsymmetrisk placering kommer att kunna ha en menlig inverkan på tolkningen av resultatet.

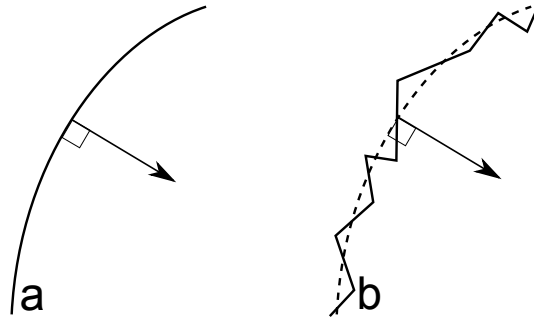
2.5 Att bestämma normalriktningen för en mätpunkt

En enskild mätpunkt innehåller inte någon relevant information förrän den sätts i relation till ett antal andra mätpunkter eller tunnelgeometrin. Tillsammans ger mätpunkterna dock en vag förnimmelse av tunnelkonturens form, vilket är en egenskap som är relevant att utnyttja då det ofta är tekniskt komplicerat att ta fram den relevanta 3D-geometrin för tunneln kring mätpunkterna. Den mest naturliga referenspunkten för en grupp mätpunkter blir därför punkternas gemensamma tyngdpunkt. Är mätpunkterna uppsatta på ett symmetriskt sätt i bergrummet kommer tyngdpunkten att ligga väldigt nära tunnelns centrumlinje och sannolikt en bit ovanför tvärsnittets tyngdpunkt. För tunnlar med normal



Figur 7: Ett exempel på en mindre lyckad utplacering av mätprismor. Fyra av dem sitter approximativt i samma plan men ett avviker med nästan 2 meter i djupled. I detta fall krävs ett visst mått av handpåläggning i analysen för att den framtagna sektionen skall stämma med tunnelsektionen.

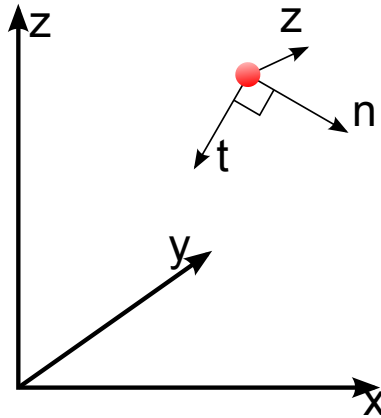
hästskoform kommer en tänkt linje från varje mätpunkt till mätpunkternas gemensamma tyngdpunkt att vara en rimlig approximation av normalriktningen för ytan mätpunkten sitter på, huvudsakligen för att tyngdpunkten kommer att vara placerad centralt i det tvärsnitt som man försöker mäta konvergensen i. Att använda punkternas gemensamma tyngdpunkt innebär dock att det uppstår ett systematiskt vinkelfel mellan punkternas förväntade rörelseriktning och den approximerade normalriktningen. I de fall då konvergenscentrums position kan antas vara känd på förhand så är det naturligtvis bättre att välja en sådan punkt som referens.



Figur 8: Normalriktningen för en punkt pp en slät kurva och hur normalriktningen för en oregelbunden kurva tolkas i detta fall.

2.6 Att bestämma tvärsnittets position från mätpunkternas placering

Den exakta placeringen av mätpunkterna kommer att bero på bergytans utseende. Det är därför inte alls orimligt att mätprismorna hamnar uppemot en halvmeter ifrån det tänkta planet. För att underlätta analysen är det därför lämpligt att definiera upp ett plan som mätpunkterna projiceras mot på ett sådant sätt att de normalvektorer som definieras alla hamnar i samma plan. Följaktligen kommer mätpunkternas gemensamma tyngdpunkt att befinna sig i det planet och detta kan användas som utgångspunkt för att bestämma en helt generell metod för att konstruera ett optimalt, minsta-kvadrat-anpassat, plan för mätsektionen. Tvärsnittet i vilket man avser mäta är ofta definierat enbart med en position längs någon längdmätning. Mätdata presenteras dock inte i samma koordinatsystem varför det underlättar att definiera tvärsnittet utifrån mätprismornas position snarare än från den teoretisk tunnelkontur. Detta tillvägagångssätt kan verka omständligt men har ett antal distinkta fördelar; planet kan definieras upp utifrån mätpunkterna enbart och metoden fungerar



Figur 9: *Det globala koordinatsystemet, x, y, z och det lokala koordinatsystemet med normalriktningen, n , tangentialriktningen, t , och djupriktningen, z .*

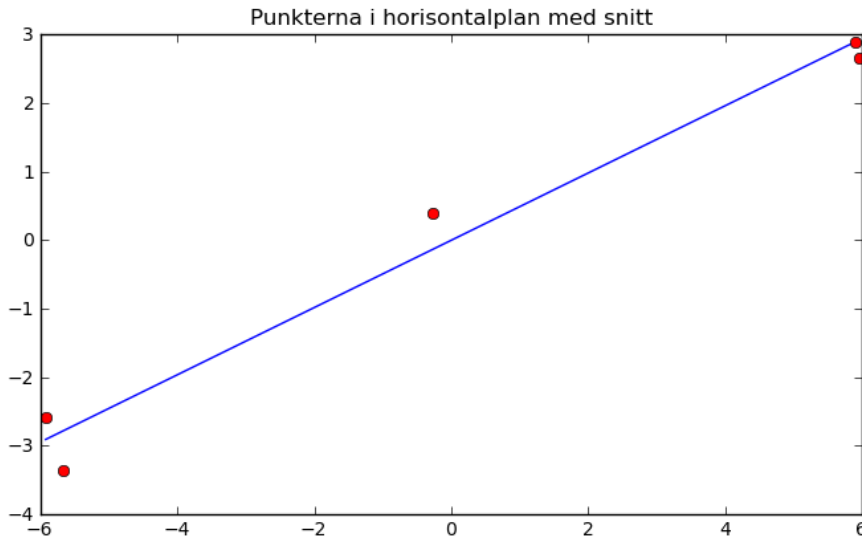
oavsett tunnelns riktning, d.v.s. den fungerar lika bra för järnvägstunnlar som vertikalschakt.

2.7 Teckenkonvention

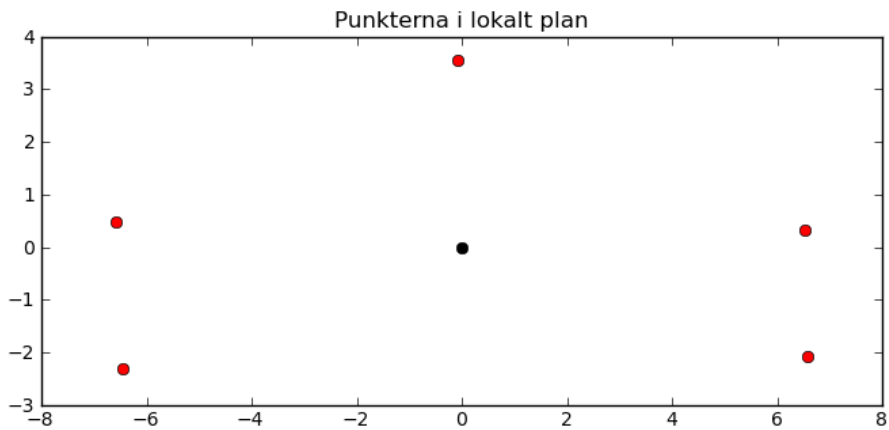
Om tunneln är ytligt belägen är det inte orimligt att olika delar av konturen rör sig åt olika håll, d.v.s. att taket rör sig uppåt samtidigt som väggarna rör sig inåt. För att kunna kvantifiera dessa rörelser på ett jämförbart sätt är det viktigt att resultat presenteras med en konsekvent teckenkonvention. Förslagsvis låter man teckenkonventionen för konvergensen vara kopplad till tunnelgeometrin så att en negativ konvergens betyder att tunneln blivit mindre och positiv rörelse i taket blir uppåt. Detta är dock tvärt om mot vad som skulle vara det naturliga om man utgår från en analys av spänningstillståndet i det omgivande berget, där en positiv kraft är riktad ut från ytan. Korrekt illustrerat bör dock alla frågetecken om rörelsernas faktiska riktningar vara uttraderade.

2.8 Felkällor

Om mätprismorna rör sig relativt berget kommer detta ge upphov till ett fel som inte kommer att gå att skilja från en bergrörelse. Skall man mäta upp en position med en repeterbar noggrannhet på under en mm flera gånger på raken är det därför viktigt att mätprismorna inte påverkas mellan mätningarna. De



Figur 10: Mätpunkternas position sett från ovan i en mätning från ett projekt i Stockholmsområdet. De röda punkterna är mätpunkter och den blå linjen representerar ett kvadratanpassat plan för punkterna. Skalan är i meter.



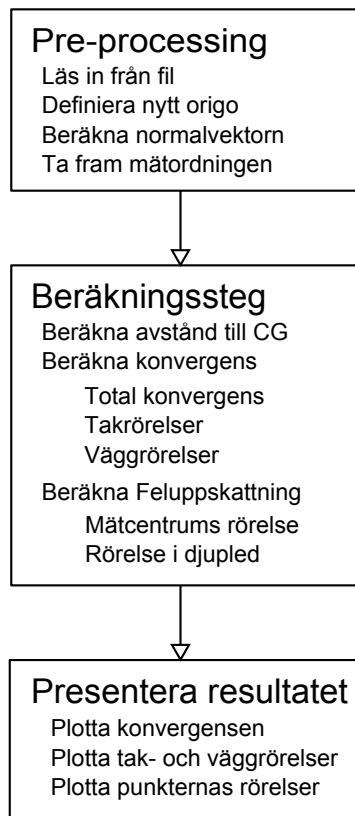
Figur 11: Mätpunkterna i det anpassade planet. Röda punkter är mätpunkter, den svarta är deras gemensamma tyngdpunkt. Skalan är i meter.

får alltså inte monteras ner utan måste skyddas mellan mättillfällena, vilket i praktiken innebär att de måste kapslas in så att de inte påverkas mekaniskt vid sprängning. Vid inmätningen av mätprismorna så positioneras mätstationen i det globala koordinatsystemet genom inmätning av ett antal fixpunkter med känd position. I en tunnel resulterar detta i ett polygontåg där mätfelen ackumuleras och resultatet blir ett systematiskt fel i mätpunkternas positioner som kommer att variera från mättillfälle till mättillfälle. Detta fel kommer dock att vara samma för alla mätpunkter varför det är möjligt att eliminera felet så att det inte bidrar till uppskattningen av konvergensen. En variant av handhavandefel som kommer att ge märkliga effekter på resultatet är ifall mätdata presenterats med för få gällande siffror. Efter koordinattransformen kommer det inte att bli uppenbart vid inspektion av de numeriska värdena att de är trunkerade, men rörelserna kommer att vara bergänsade till vissa fixa nivåer, vilket skapar ett hackigt utssende på konvergenskurvorna.

3 Algoritmbeskrivning

3.1 Implementation

I detta projekt har algoritmen implementerats enligt flödesschemat ovan. Alla steg behöver inte utföras i exakt den ordningen som beskrivs, t.ex. så kommer inläsningen av data från fil att bero på hur informationen har lagrats i det aktuella projektet. Mest sannolikt är att mätdata levereras i ett kalkylblad som uppdateras under projektets gång och programmet bör då anpassas för att kunna läsa från det aktuella kalkylbladet.



Figur 12: *Algoritmens struktur*

3.2 0-mätningen

Den första mätningen, kallad 0-mätningen, kommer att få agera referens för de andra mätningarna. Det är från denna mätning som mätsektionens position och orientering bestäms och även om det sannolikt har skett berg rörelser innan mätningen har utförts kommer det ändå att vara denna mätning som får agera referensnivå. Att extrapolera berg rörelserna innan mätningen utförts är säkert möjligt men det ämnet lämnas till en annan rapport.

3.3 Definiera nytt origo

Mätningarna är sannolikt utförda i något av de vanligare koordinatsystemen, vilket blir ohanterbart för dessa syften. Genom att definiera nytt origo i punkternas gemensamma tyngdpunkt fås ett mer naturligt utgångsläge där mätvärdena representerar faktiska avstånd och antar värden som går att kontrollera gentemot de fysiska dimensioner som berg rummet antar. Tyngdpunktens läge i det globala koordinatsystemet definieras enkelt som medelvärdet av mätpunkternas positioner.

3.4 Beräkna normalvektorn till mätsektionen

Genom att anta att mätpunkternas placering är anpassad för att i möjligaste mån ligga i en relevant sektion till berg rummet är det möjligt att ta fram en mätsektion utan att explicit känna till det teoretiska eller faktiska utseendet på berg rummet. Detta har också fördelen att sektionen kan optimeras till mätpunkternas faktiska placering. Detta förenklar dessutom analysen avsevärt ifall mätsektionen är placerad i en tunnel som inte är horisontell.

Ett minstakvadratanpassat plan för mätsektionen kan tas fram relativt enkelt genom att utnyttja observationen att planets normalvektor kommer vara parallell med minsta egenvektorn för punktmolnets tröghetsmatris. Dvs, normalriktningen kommer vara den riktning längs vilken kvadratsumman av avstånden mellan punkterna och planet är som minst. Genom att lagra 0-mätningen i en $n \times 3$ -matris, X , där n är antalet mätpunkter, förs tröghetsmatrisen genom att ta matrisprodukten av matrisens transponat med sig självt, $X^T X$. Minsta egenvektorn till den kommer då att vara en färdignormerad vektor riktad i det eftersökta planets normalriktning och får utgöra grunden till koordinattransformen. I exempelimplementationen väljs sedan de andra koordinatriktningarna så att vertikal- och horisontalriktningarna bevaras i möjligaste mån. Detta är inte strikt nödvändigt men det underlättar illustrationen av mätpunkternas rörelser.

3.5 Ta fram mätordningen

En annan aspekt som kan vara värd att beakta är vilken ordning punkterna är inmätta. Beroende på hur bergrummets drivningsriktning är orienterad i förhållande till det globala koordinatsystemet så kommer ordningen på punkterna att vara med eller moturs, vilket måste tas i beaktande när resultatet presenteras.

4 Tolkning av resultat

4.1 Illustration av konvergens

Stora bergrörelser, som är att förvänta vid stora geometrier, höga spänningar eller eftergivlig bergmassa, är sannolikt lättare att tolka, då mätnoggrannheten har en relativt liten inverkan på resultatet. Den stora utmaningen ligger i att särskilja bergrörelser från mätbrus i de fall då de förväntade bergrörelserna är små, och mätavvikelserna större. Algoritmen som sådan bygger dock på att bergrörelserna bara kan ske i en specifik riktning, normalriktningen, och att mätfelet är slumpmässigt i alla riktningar. Genom att dela upp rörelsen i varje punkt i tre vinkelräta komponenter så isolerar man bergrörelsen från mätfelet. Den del av den uppmätta rörelsen som inte är riktad i normalriktningen utgår därför ett mått på mätfelet. Mätfelet kan dessutom vara systematisk, d.v.s. ett uppställningsfel eller liknande. Detta fel artar sig som en uppmätt rörelse som är lika för alla mätpunkter. Ett systematiskt fel kommer dock att flytta mätpunkternas gemensamma tyngdpunkt varför det felet inte påverkar punkternas avstånd till densamma. Den totala konvergens kan, om den beräknas som förändringen av medelavstånden mellan mätpunkterna och deras tyngdpunkt, anses vara fri från systematiska fel. Medelvärde av reströrelsen, d.v.s. rörelser i djupled och rörelser tangentiellt med bergytan, blir då ett mått på mätnoggrannheten och är ett lämpligt val för storleken på felstaplarna. För att kunna särskilja mellan olika, vanligt förekommande, deformationsmoder bör man även illustrera hur taket och väggarna har rört sig. I de flesta förekommande fall sitter det ett mätprisma i taket varpå takets rörelse enklast illustreras med hur avståndet mellan den mätpunkten och mätningarnas tyngdpunkt har ändrats med tiden. Om det också sitter två mätpunkter spegelsymmetriskt placerade i rummet är väggarnas rörelse utåt eller inåt lätt att illustrera genom att titta på avståndet de punkterna emellan. I det fallet behöver man inte gå via tyngdpunkten. Man bör dock ha i beaktande att det avståndet är dubbelt så långt som avståndet till tyngdpunkten, så för att få ett värde som är jämförbart med den totala konvergens bör förändringar i avståndet mellan väggarna delas med två.

4.2 Illustration av mätpunkternas rörelse

Om den uppmätta konvergens ger upphov till frågor om de individuella mätpunkternas rörelser eller mätningarnas kvalitet är det relevant att plotta även dessa. I denna graf är det dock fullt rimligt att titta på rörelserna i planet och inte bara längs normalriktningen så att eventuella störningar på ett enskilt prisma, eller oväntade bergrörelser, kan upptäckas. Då en rörelse hos en

enskild mätpunkt oftast är flera storleksordningar mindre än dimensionerna på bergrummet kan man inte plotta alla punkter i samma diagram och med samma skala. Antingen för varje punkt illustreras var för sig, eller så får man överdriva rörelserna med en faktor, så att de går att utläsa i en gemensam plot. I denna rapport är punkternas rörelser illustrerade var för sig, men ordnade på ett sådant sätt att deras relativa positioner bibehålls.

4.3 Illustration av den totala konvergensen

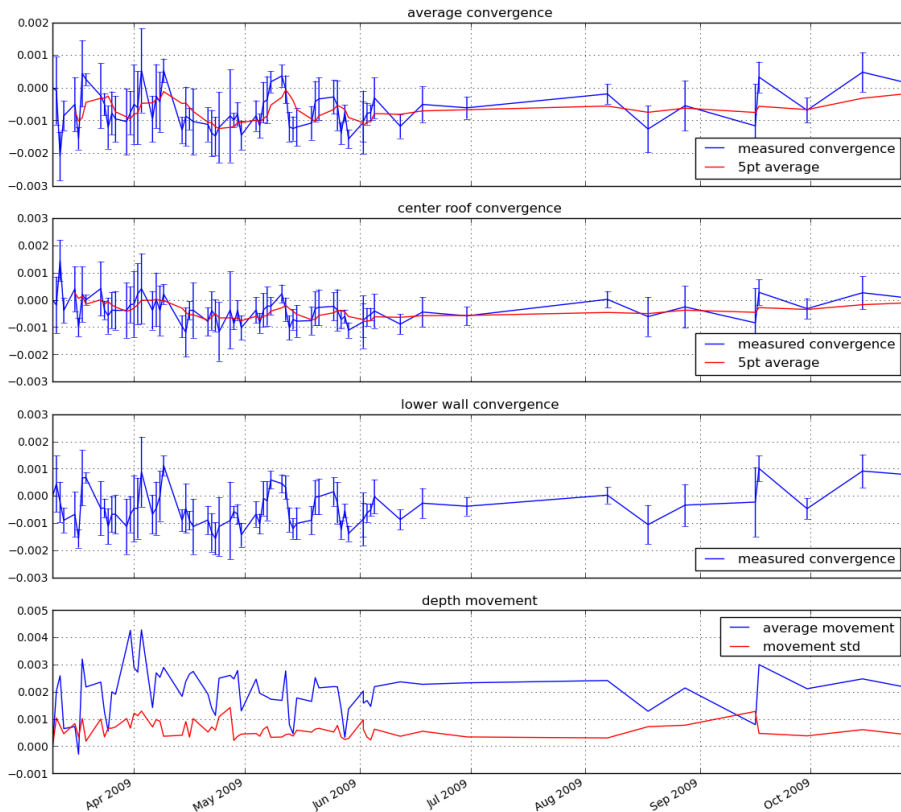
Den sammantagna konvergensen, och andra berggrörelser, utvärderas allt som oftast som en funktion av tiden. En fallgrop med detta är dock att mätningarna inte alltid sker helt regelbundet varför en skala baserad enbart på mätningarnas ordning kommer att ge en skev bild av konvergensutvecklingen om det varit avbrott i produktionen, för t.ex. semester eller helger. Det är därför lämpligt att använda faktisk kalendertid som skala på x-axeln. Med den mjukvara som används i exempelimplementationen så finns det ett inbyggt stöd för hantering av tid och datum som dataformat för axlarna och programvaran väljer själv lämplig skala beroende på spannet av värden. För korta intervall blir det klockslag och datum, för längre blir det månader och år. Detta gör att diagrammet kommer att redovisa korrekt deformationshastighet oavsett hur tätt mätningarna har skett. Detta leder i sin tur till att det är lättare att avgöra om deformationsförloppet har avklingat eller ej.

För att filtrera bort mätbrus ytterligare är ett löpande fempunkters medelvärde tillagt till figurerna (röd linje). Den linjen blir klart jämnare än de fortfarande rätt brusiga linjerna från mätningarna. För att få fram en uppskattning för felstaplarnas värde har avvikelsen i z-led använts. I idealfallet skall det inte ske någon rörelse alls i den riktningen och den uppmätta rörelsen har därför använts för att ta fram ett mått på mätningarnas tillförlitlighet. Medelavvikelsen och standardavvikelsen för denna är plottade i ett diagram i samma figur och standardavvikelsen representerar den stokastiska mät-noggrannheten och har därför blivit det mått som använts till felstaplarna.

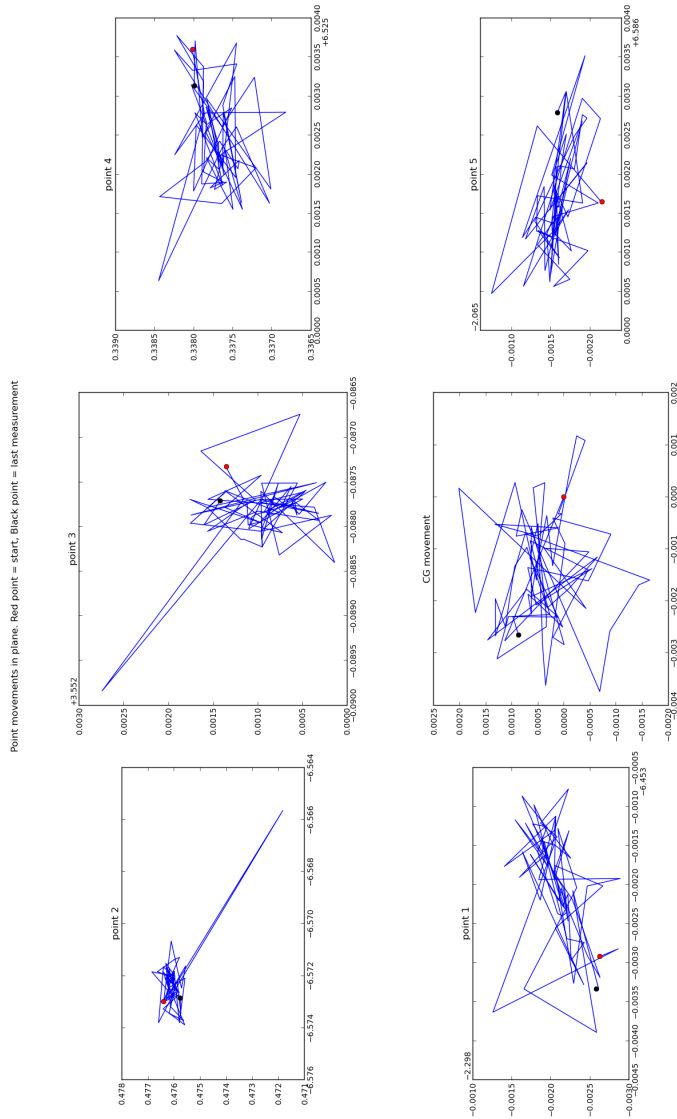
5 Exempel på mätningar

För att illustrera algoritmen och några av de svårigheter som kan uppstå när man skall tolka mätdata är tre mätserier medtagna som exempel. De första exemplen är hämtat från ett projekt i Stockholmsområdet där två parallella berggrum utfördes i följd. Mätningarna utfördes för att först bekräfta att bergrörelserna var små vid uppförandet av det första berggrummet och sedan för att kontrollera att väggen mellan berggrummen inte rörde sig under produktionen av det andra berggrummet. Då bergkvaliten var god och bergspänningarna förväntades vara måttliga så var de prognosticerade rörelserna mycket små. Det skulle också visa sig att utförandet av mätningarna var behäftat med vissa brister vilket gjorde att en konventionell analys av mätningarna indikerade mycket större bergrörelser än vad som var förväntat.

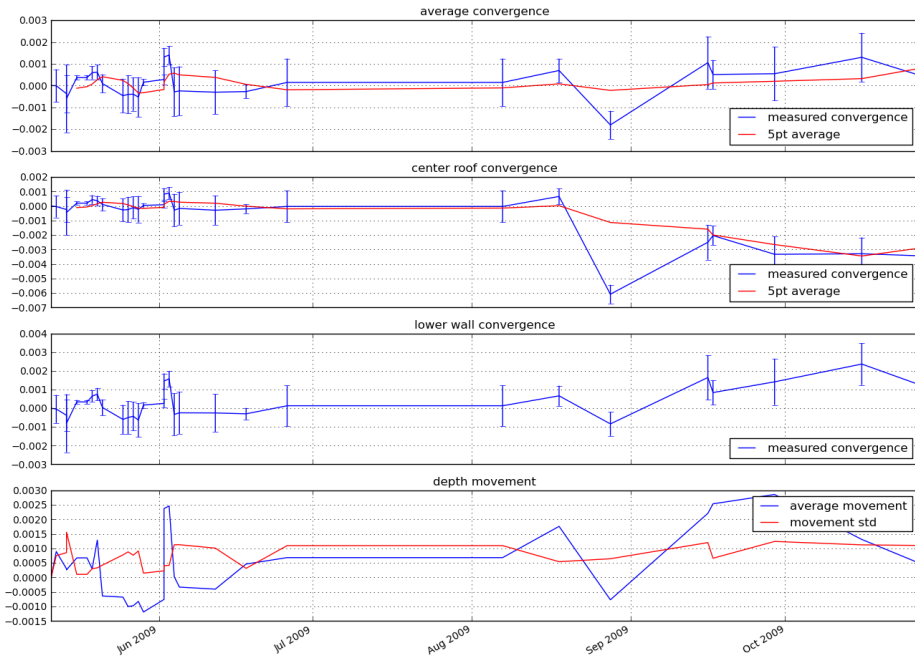
Det tredje exemplet är från ett annat Stockholmsprojekt där berget var sämre beskaffat än i de första två exemplen. De förväntade rörelserna var därför större, men även där så gjorde utförandet av mätningarna att resultatet var mycket svårtolkat utan en noggrannare analys av mätfelen.



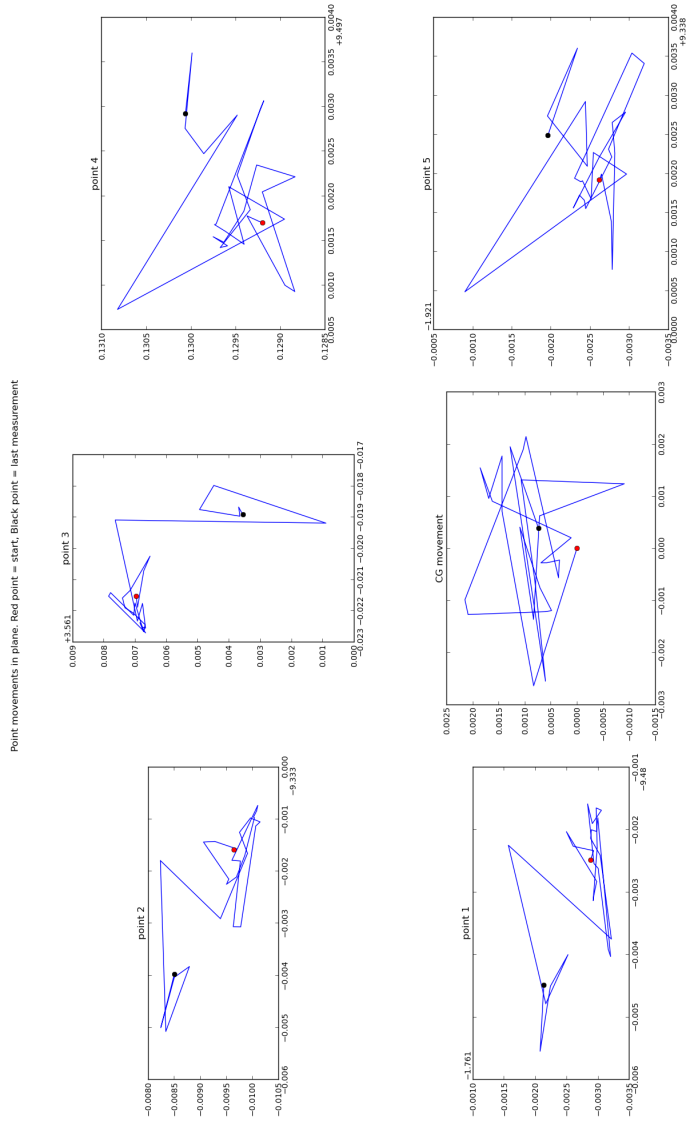
Figur 13: Mätningar från exempel ett. översta grafen visar medelkonvergens (blå linje) baserad på samtliga mätpunkters rörelse. Den röda linjen är ett löpande medelvärde över de senaste 5 mätningarna. Den andra grafen visar hur mätpunkten i taket rört sig i höjddled. Den tredje grafen visar hur det horisontella avståndet mellan mätpunkterna mitt på väggen har varierat. Diagrammet längs ner visar medelfelet i djupled och dess standardavvikelse. Felstaplarna är baserade på standardavvikelsen på djupledsfelet. Nollnivån i samtliga fall är baserade på den första mätningen och är därför inte någon absolut nollnivå. Den enda rörelsen som ger något signifikant resultat är rörelsen i taket som verkar konvergera 0,5 mm.



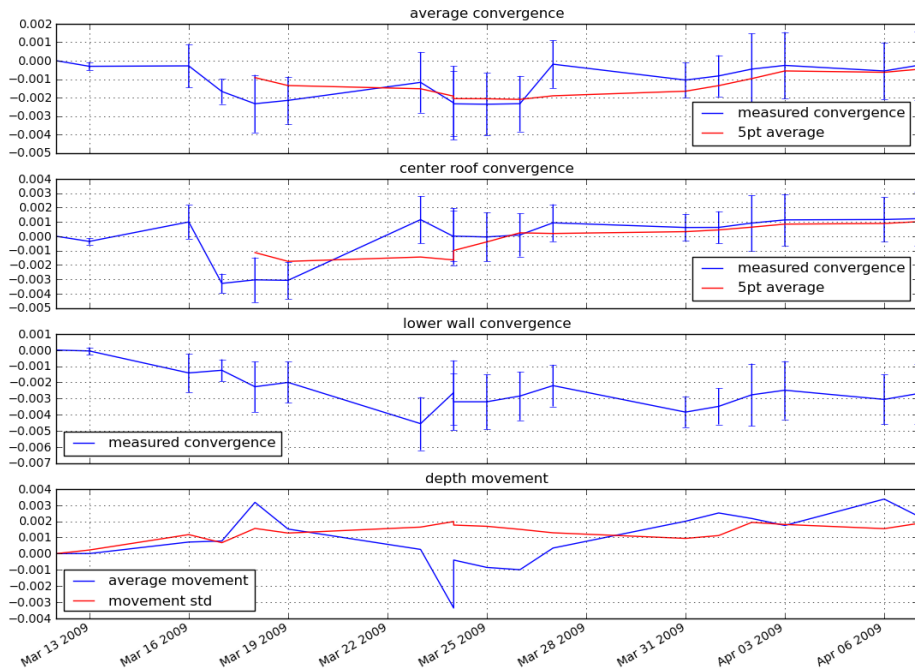
Figur 14: De uppmätta rörelserna hos de enskilda mätpunkterna i exempel ett. Vid ett mättillfälle monterades prismet i punkt 2 på felaktigt vilket gav ett onaturligt stort utslag. Det felet påverkade den gemensamma tyngdpunktens placering vilket gör att det fått genomslag även på de andra punkternas tolkade rörelser. Som synes är rörelserna i det närmaste helt slumpmässiga vilket är en indikation på att mätningarna störs av ett mätfel som är större än de faktiska berg-rörelserna. Skalan är i meter.



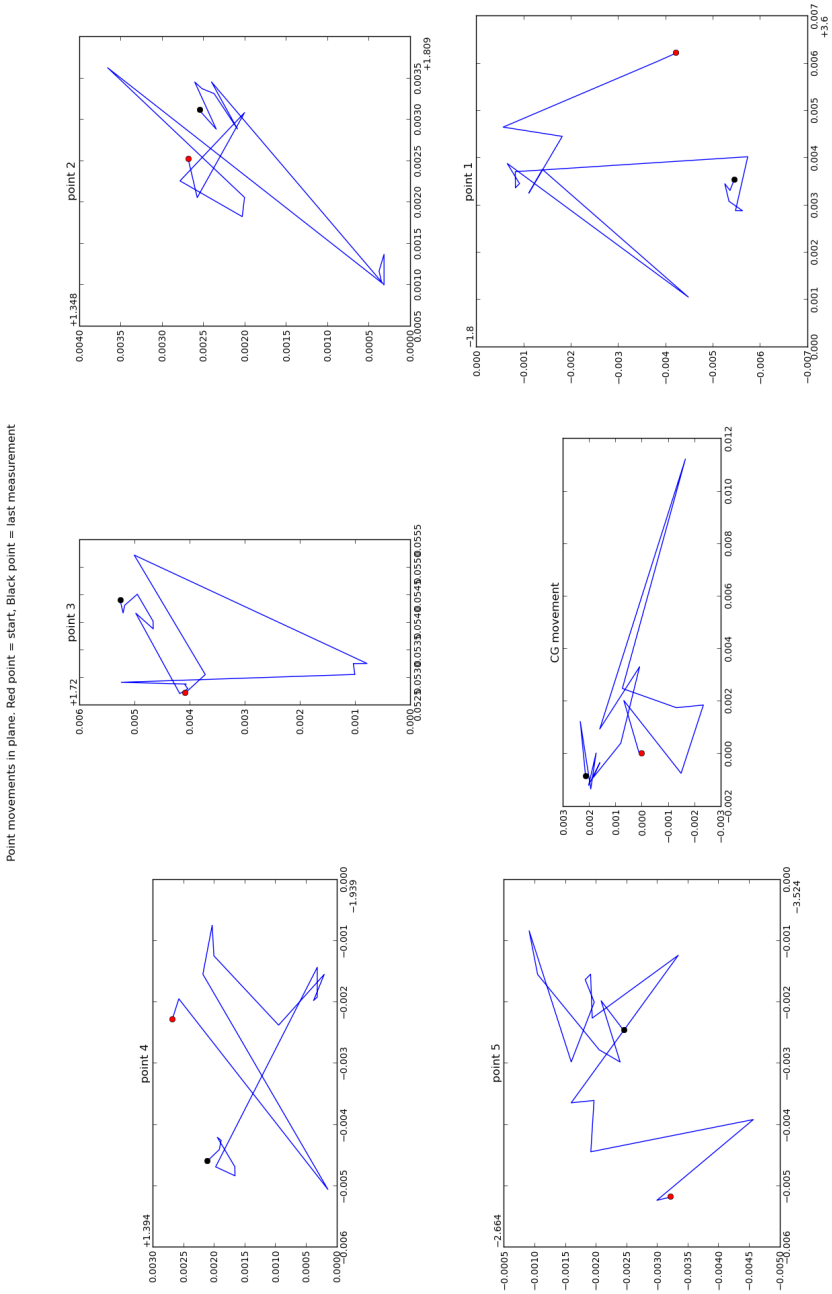
Figur 15: Mätningar från exempel 2. Här syns tydligt att taket rört sig nedåt och väggarna rört sig utåt. Detta har dock resulterat i en medelkonvergens nära noll. Även här har det varit problem med prisma som inte blivit korrekt monterade och andra mätstörningar. Exempel två kommer från samma projekt men är från bergrummet bredvid. Detta bergrum är något större men i samma typ av berg. De förväntade rörelserna är därför något större men mätningarna är utförda på samma sätt, med samma utrustning och av samma personal som i exempel ett.



Figur 16: Mätpunkternas rörelser i exempel två. Speciellt intressant är storleken på rörelsen för den gemensamma tyngdpunkten (CG Movement) eftersom den indikerar repeterbarheten hos mätningarna. Det är tydligt från rörelserna att väggarna rör sig utåt och det är också troligt att taket rört sig nedåt. Det stora hoppet i höjddled för taket är dock sannolikt resultatet av ett dåligt monterat mätprisma.



Figur 17: Konvergensdiagram från exempel tre. I detta fall har kvalitén på mätningarna varit det största problemet. Med en ofiltrerad analys hade det framstått som om deformationerna hade varit flera gånger större än vad de egentligen var, vilket hade kunnat innebära stora extrakostnader i onödan.



Figur 18: Punkternas rörelse i exempel 3. Som synes så domineras mätningarna av slarvigt uppsatta prisma. Den gemensamma tyngdpunktens rörelse är över en cm i sidled vilket är en tydlig indikation på dåligt utförda mätningar.

6 Slutsatser

I bra berg är konvergensmätningar ofta begränsade av utförandet på mätningarna. även om utrustningen har en teoretisk noggrannhet som möjliggör konvergensmätningar ned till bråkdelar av millimetrar så är det inte helt elementärt att tillgodoräkna sig den noggrannheten på ett repeterbart sätt när mätningarna utförs under tidspress av personal som inte är införstådda med mätningarnas syfte.

Den största enskilda störkällan när man utför laserbaserade konvergensmätningar är dock ifall de prismor som markerar mätpunkterna inte får sitta kvar mellan mättillfällena. Prismorna är dyra och går lätt sönder när de sitter i närheten av stuff. De sitter också ofta så pass högt upp att det är tidsödande att montera av och på skydd inför varje mättillfälle. En mättekniker som inte är införstådd med mätningarnas syfte kommer därför att vara benägen att montera ned dem mellan varje mätning vilket skapar en mätosäkerhet som många gånger kan vara större än de bergrörelser man vill mäta upp. Det bör finnas en dialog mellan beställaren och utföraren så att dessa fel kan begränsas.

Även en mätning med stora fel går dock att analysera då rörelserna man eftersöker sker i en distinkt riktning. Analysen av mätningarna går dessutom att automatisera till stor grad. I de projekt som exempeldata har hämtats från har varje ny mätning resulterat i ett par minuters arbete med filkonverteringar, men metoden skulle gå att anpassa så att den läser in mätningarna direkt ifrån en databas eller rent av mätinstrumentet, beroende på vad projektet kräver. I ett projekt där resultatet från konvergensmätningarna används som beslutsunderlag kan analysen mycket väl vara klar inom någon minut från det att mätdata har rapporterats in. Om lasermätningarna dessutom kan utvecklas så att användandet av ömtåliga mätprismor kan undvikas så kan konvergensmätningar komma att bli vanligare i framtida projekt.

A Exempelimplementation

```

# -*- coding: utf-8 -*-
""" Detta program analyserar konvergensmatningar i 3D """

import pylab as pl
import numpy as np
import matplotlib as mp

chekAbs=False

#las in forsta filen (nollmatning)
X2 = np.loadtxt('0.dat')
#Byt plats pa X och Y
conv = pl.matrix('0,1,0;1,0,0;0,0,1')
X = X2*conv
#Flytta origo till tyngdpunkten CG
CG=sum(X/5)
X=X-CG
x = X[:, 0]
y = X[:, 1]
z = X[:, 2]

#M blir troghetsmatrisen for matpunkterna
M=np.dot(X.T,X)

#Ta fram minsta egenvektorn for M och
#anvand som normalvektor till planet.
U, s, V = np.linalg.svd(M)
#for horisontella tunnlar
P = [-U[0, 2]/U[1, 2], 0]

pl.figure(1)
pl.clf()
pl.plot(x, np.polyval(P, x))
pl.plot(x, y, 'ro')
ax = pl.gca()
ax.set_aspect('equal')
pl.title('Punkterna_i_horisontalplan_med_snitt')

```



```

# Vrid till lokalt plan.
N = np.mat([P[0], 1])/np.sqrt(P[0]**2+1)
# 3D
N3 = U[:, 2].T
#For tunnel 3 med daligt uppsatta prisman
#N3[0,0]=-1.0
#N3[0,1]=0.0
#N3[0,2]=0.0

#ta fram nytt koordinatsystem
Xtmp=np.cross(N3, pl.matrix([0,0,1]))
Xtmp=Xtmp/np.dot(Xtmp,Xtmp.T)**0.5
#om mojligt bor X peka i positiv riktning. Sign far ej bli 0
Xtmp=Xtmp*np.sign(Xtmp[0,0]+1e-15)

Ytmp=np.cross(Xtmp,N3)
#kolla att Y ar uppat
Ytmp=Ytmp*np.sign(Ytmp[0,2]+1e-15)

#Bygg matrisen med koordinataxlar
U=np.bmat([np.mat(Xtmp.T), np.mat(Ytmp.T), N3.T])

#projicera i lokalt plan
#3D med N3

#projektionen (denna kraver lite eftertanke)
OST=(X.T-N3.T*(N3*X.T)).T*U
Res=(OST-X*-U)[: ,2]
OST1nk=OST[0 ,:]
OST2nk=OST[1 ,:]
OST3nk=OST[2 ,:]
OST4nk=OST[3 ,:]
OST5nk=OST[4 ,:]

#hitta rotationsriktningen
order = (np.double(OST1nk[0, 0] < OST5nk[0, 0]) - .5)*2
order = OST1nk[0, 0] < OST5nk[0, 0]
Pos1 = 4*order+6*(1-order)
Pos2 = 1*order+3*(1-order)

```

```

Pos3 = 2
Pos4 = 3*order+1*(1-order)
Pos5 = 6*order+4*(1-order)
PosCG = 5
#
pl.figure(2)
pl.clf()
pl.plot(OST1nk[0, 0], OST1nk[0, 1], 'ro')
pl.plot(OST2nk[0, 0], OST2nk[0, 1], 'ro')
pl.plot(OST3nk[0, 0], OST3nk[0, 1], 'ro')
pl.plot(OST4nk[0, 0], OST4nk[0, 1], 'ro')
pl.plot(OST5nk[0, 0], OST5nk[0, 1], 'ro')
pl.plot(0,0, 'ko')
#
ax = pl.gca()
ax.set_aspect('equal')
pl.title('Punkterna_i_lokalt_plan')

#las in datumfilen och anvand som skala
datum = pl.csv2rec('tider.txt', names = 'date')
dist = len(datum.date)

#Las in resten av filerna
OST1nk = OST1nk.T
OST2nk = OST2nk.T
OST3nk = OST3nk.T
OST4nk = OST4nk.T
OST5nk = OST5nk.T

for i in range(1, len(datum.date)): #antalet datum ger antalet filer
    fname = '%d.txt'% i
    Y = np.loadtxt(fname)
    Y = np.mat(Y*conv)-CG #byter plats pa y och x och flyttar origo
    tmp=Y.T
    tmp=tmp-(N3.T*N3*tmp) #projicerar ner i planet
    tmp=tmp.T*U #byter till planets koordinater
    Res=np.bmat([Res, (tmp-Y*-U)[: , 2]])
    OST1nk = np.bmat([OST1nk, tmp[0, :].T]) #staplar ihop
    OST2nk = np.bmat([OST2nk, tmp[1, :].T])
    OST3nk = np.bmat([OST3nk, tmp[2, :].T])
    OST4nk = np.bmat([OST4nk, tmp[3, :].T])
    OST5nk = np.bmat([OST5nk, tmp[4, :].T]) #slut pa linalgen.

```

```

last = len(OST1nk.T)-1

#berakna punkternas medelavstand till CG
CGx = (OST1nk[0, :]+OST2nk[0, :]+
      +OST3nk[0, :]+OST4nk[0, :]+OST5nk[0, :])/5
CGy = (OST1nk[1, :]+OST2nk[1, :]+
      +OST3nk[1, :]+OST4nk[1, :]+OST5nk[1, :])/5

tmpcg = np.bmat('CGx;CGy')
fooz = np.zeros((1, len(datum)))
tmpcg = np.bmat('tmpcg;fooz')
#koordinaterna relativt CG
o1nc = (OST1nk-tmpcg)[0:2, :].A #fimpär z ifall att..
o2nc = (OST2nk-tmpcg)[0:2, :].A
o3nc = (OST3nk-tmpcg)[0:2, :].A
o4nc = (OST4nk-tmpcg)[0:2, :].A
o5nc = (OST5nk-tmpcg)[0:2, :].A

#test av djupfel
depthE=(Res.T-Res[:,0].T).std(1).A.reshape(dist)
#depthStd=(Res.T-Res[:,0].T).std(1).A.reshape(dist)

#plotta rorelserna relativt CG
def plotMovement(corrPos):
    """ Plottar rorelsedigrammet """
    pl.plot(corrPos[0, :], corrPos[1, :], 'b')
    pl.plot([corrPos[0, 0]], [corrPos[1, 0]], 'ro')
    pl.plot([corrPos[0, last]], [corrPos[1, last]], 'ko')
    pl.scatter(corrPos[0, :], corrPos[1, :],
              marker='o', alpha=0.6, s=np.abs(depthE))

fig =pl.figure(3)
pl.clf()

fig.suptitle('Point_movements_in_plane_Red_point=_start,
            Black_point=_last_measurement', fontsize=12)

pl.subplot(2, 3, Pos1)
plotMovement(o1nc)

```

```

if chekAbs:
    plotMovement(OST1nk[0:2, :].A)
    pl.title(u'point_1')
    ax = pl.gca()
    ax.set_aspect('equal')

    pl.subplot(2, 3, Pos2)
    plotMovement(o2nc)
    if chekAbs:
        plotMovement(OST2nk[0:2, :].A)
        pl.title(u'point_2')
        ax = pl.gca()
        ax.set_aspect('equal')

    pl.subplot(2, 3, Pos3)
    plotMovement(o3nc)
    if chekAbs:
        plotMovement(OST3nk[0:2, :].A)
        pl.title(u'point_3')
        ax = pl.gca()
        ax.set_aspect('equal')

    pl.subplot(2, 3, Pos4)
    plotMovement(o4nc)
    if chekAbs:
        plotMovement(OST4nk[0:2, :].A)
        pl.title(u'point_4')
        ax = pl.gca()
        ax.set_aspect('equal')

    pl.subplot(2, 3, Pos5)
    plotMovement(o5nc)
    if chekAbs:
        plotMovement(OST5nk[0:2, :].A)
        pl.title(u'point_5')
        ax = pl.gca()
        ax.set_aspect('equal')

    pl.subplot(2, 3, PosCG)
    plotMovement(np.bmat('CGx;CGy').A)
    ax = pl.gca()
    ax.set_aspect('equal')

```

```

pl.title(u'CG_movement')

#ta fram distanserna, pythagoras...
dst1 = np.sqrt(np.add.reduce(o1nc * o1nc))
dst2 = np.sqrt(np.add.reduce(o2nc * o2nc))
dst3 = np.sqrt(np.add.reduce(o3nc * o3nc))
dst4 = np.sqrt(np.add.reduce(o4nc * o4nc))
dst5 = np.sqrt(np.add.reduce(o5nc * o5nc))
avg = (dst1 + dst2 + dst3 + dst4 + dst5)/5
avg = avg-avg[0]

#shift for a running average of 5, influences plotting

avgShift = mp.mlab.movavg(avg, 5)
avgdst3 = mp.mlab.movavg(dst3, 5)

fig = pl.figure(4)
pl.clf()
pl.subplot(4, 1, 1)

pl.errorbar(datum.date, avg, yerr=depthE, fmt='_')
line1 = pl.plot(datum.date, avg, 'b')
line2 = pl.plot(datum.date[4:dist], avgShift, 'r')
pl.legend((line1, line2),
          ('measured_convergence', '5pt_average'), loc='best')

#fig.autofmt_xdate()
pl.title(u'average_convergence')
pl.grid()
pl.subplot(4, 1, 2)
pl.errorbar(datum.date, dst3 - dst3[0], yerr=depthE, fmt='_')
line1 = pl.plot(datum.date, dst3 - dst3[0], 'b')
line2 = pl.plot(datum.date[4:dist], avgdst3 - dst3[0], 'r')
pl.legend((line1, line2),
          ('measured_convergence', '5pt_average'), loc='best')

#fig.autofmt_xdate()
pl.grid()
pl.title(u'center_roof_convergence')

```

```

lowWallC=np.abs(o1nc[0,:]-o5nc[0,:])
lowWallC=lowWallC-lowWallC[0]
pl.subplot(4, 1, 3)
pl.errorbar(datum.date, lowWallC/2,yerr=depthE, fmt='_')
line1 = pl.plot(datum.date,
                 lowWallC/2,'b', label='measured_convergence')
pl.legend(loc='best')

fig.autofmt_xdate()
pl.grid()
pl.title(u'lower_wall_convergence')
pl.draw()

pl.subplot(4, 1, 4)
line1 = pl.plot(datum.date,((Res-Res[:,0]).mean(0).T),'b')
line2 = pl.plot(datum.date,(Res-Res[:,0]).std(0).T,'r')
pl.legend((line1, line2),
          ('average_movement','movement_std'), loc='best')

fig.autofmt_xdate()
pl.grid()
pl.title(u'depth_movement')
pl.draw()

```



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befonline.org • www.befonline.org
Besöksadress: Storgatan 19



ISSN 1104-1773