

UTVÄRDERING AV FÄLTMETOD FÖR MÄTNING AV SPRUTBETONG



Andreas Sjölander

2019-01-10

SAMMANFATTNING

I den här rapporten redovisas resultat från en utvärdering av nya fältmetoder för att mäta rörelser på sprutbetong i fält. Syftet var att föreslå en metod som är snabb och pålitlig och därmed användbar för att mäta deformationer i sprutbetong under pågående produktion. Först utvärderades mekanisk mätning med mikrometerskruv och skjutmått. Försök genomförda i labb visade att repeterbarheten för denna metod var låg och det är därmed ingen lämplig fältmetod. Därefter utvärderades fotogrammetri och tekniken Digital Image Correlation (DIC) användes för att mäta sprutbetongens deformation baserat på en serie bilder. Försök genomfördes både i labb och i fält och visade att fotogrammetri har stor potential att användas för att dels mäta deformationen i sprutbetongen innan den spricker men också att mäta propageringen av befintliga sprickor. För det sistnämnda utvärderades en enkel metod där spricktillväxten kunde mätas med en vanlig mobilkamera.

Introduktion

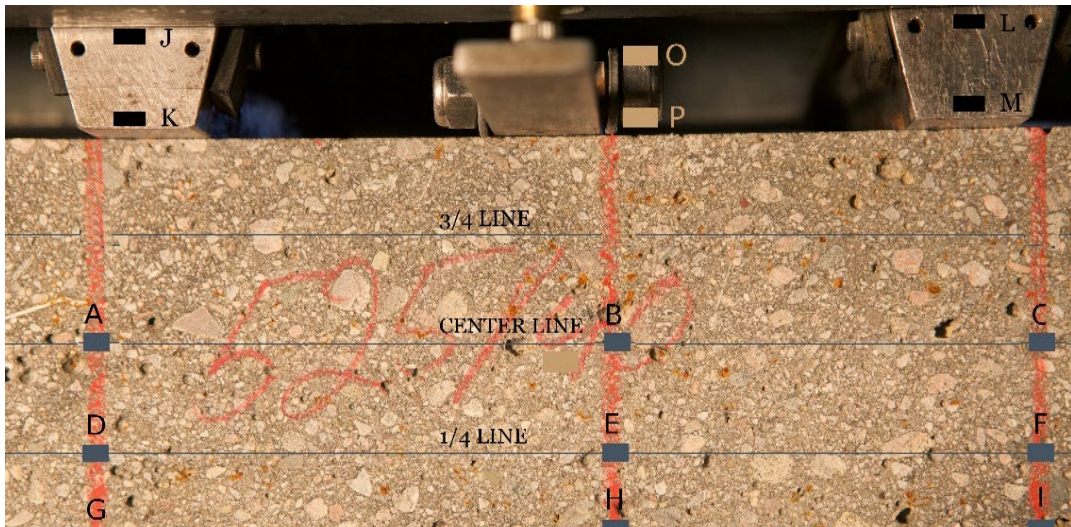
Just nu pågår en stor utbyggnad av Sveriges infrastrukturnätverk. I större städer kan det vara ont om plats att bygga på och tunnlar är därför, trots sin stora investeringskostnad, i många fall det bästa alternativet. Den vanligaste förstärkningen för våra bergtunnlar består av en samverkanskonstruktion mellan berg, fiberarmerad sprutbetong och bergbultar. Materialen samverkar genom sprutbetongens vidhäftning mot berget och/eller av bergbultar försedda med brickor som gjuts samman med sprutbetongen. Dimensionering av en bergförstärkning är ett komplext ingenjörproblem. Detta beror bland annat på att berg är ett naturligt material vars mekaniska egenskaper varierar vilket gör att fördelningen av spänningar i förstärkningen är svår att förutse. Vidare är det svårt att förutse hur mycket berget kommer deformera i samband med att tunneln drivs vilket gör det svårt att förutse lasterna som verkar på förstärkningen. Det är därför vanligt att dimensionera en bergförstärkning baserat på empiriska metoder.

Historiskt sett har få olyckor skett i svenska tunnlar där delar av sprutbetongen eller ett bergblock har fallit ned. Våra tunnlar bedöms därför som säkra. Vi vet dock inte vilka belastningar och spänningar som sprutbetongen utsätts för vilket leder till svårigheter att optimera förstärkningen och vilka krav som bör sättas på sprutbetongens kvalitet. Mätningar av sprutbetongens töjningar genomförda i tunnelmiljö är ett sätt att bättre förstå vilka spänningar den utsätts för. Dessvärre finns få mätningar av sprutbetong redovisade i litteraturen. Mätningar med traditionella mätmetoder som t.ex. trådtöjningsgivare kan vara svårt att genomföra under byggtiden då känsliga givare ska monteras på sprutbetongens yta och kopplas ihop med en datalogger som ska lämnas i tunnel. I det här projektet ska därför nya fältmetoder för att mäta sprutbetongens deformation utvärderas. Syftet är att metoden ska vara enkel att använda för att inte störa produktionen i tunneln och den ska helst kunna utföras utan att särskilt utbildad personal krävs. Utvärderingen har delats in i följande skalor och syften:

Mätningar av rörelser i sprutbetong: Syftet är att mäta rörelserna i sprutbetongen under tidiga skeden för att avgöra om risk för uppsprickning finns. Mätningar ska starta tätt efter sprutning och sedan följas upp med flera mätningar under första tiden.

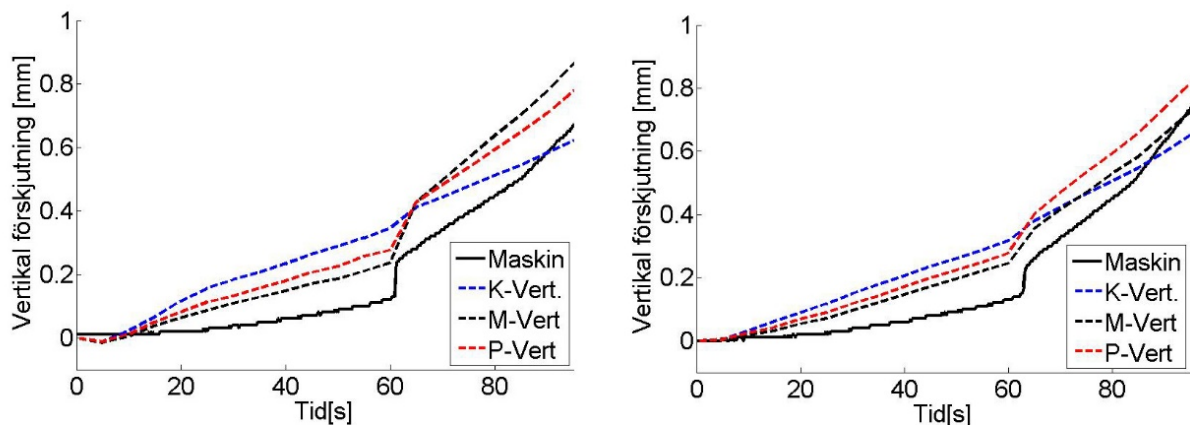
Övervakning av sprickor samt skador: Syftet är att övervaka sprickor och skadade områden för att se om dessa propagerar. När en spricka upptäcks är idén att mäta in den och ta en referensbild. Senare tas uppföljande bilder under konstruktionstiden för att se om sprickan eller det skadade området propagerar.

Mätningar av deformationer av balkar med fast kamera



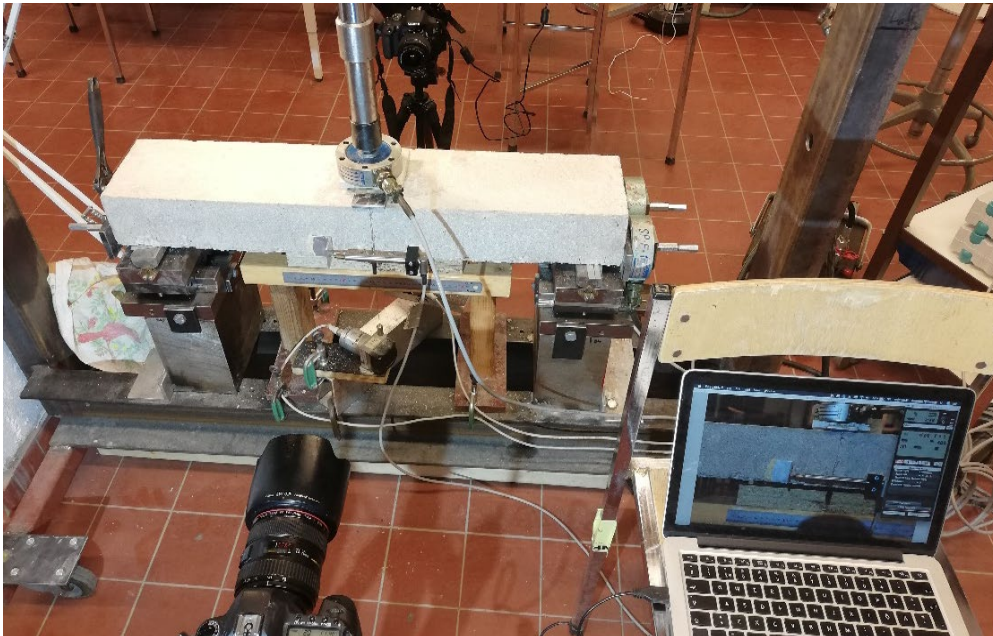
Figur 1 Foto av balken från belastningsförsök i labb och markering av resultatpunkter.

Vid belastningsförsök av sprutbetongbalkar genomförda hos Vattenfall R & D i Älvkarleby användes en fast uppställd kamera för att ta bilder med ett fast intervall. För att beräkna sprutbetongens deformationer användes programvaran PY2DIC som är utvecklad av avdelningen för Geodesi och Geoinformatik vid universitetet La Sapienza i Rom. Denna beräknar deformationen genom att följa individuella pixlars rörelse för en serie av bilder. Denna teknik benämns Digital Image Correlation (DIC). I Figur 1 visas ett foto från belastningsförsöket samt benämning av resultatpunkter. I Figur 2 visas en jämförelse mellan den deformation som mättes av maskinens LVDT samt den beräknade deformationen i punkterna K, M och P. Före sprutbetongen spricker är den relativa skillnaden mellan LVDT och fotogrammetri relativt stor. En trolig förklaring till detta är att mätningarna med fotogrammetri är baserad på deformationen på balkens ena sida medan mätningen med LVDT är medelvärdet av deformationen på båda sidor. På grund av att balkens form och yta inte är perfekt uppstår en ojämn kontakt mellan betongen och belastningspunkterna samt stödet. Detta leder till att den initiala deformationen ofta skiljer sig mellan balkens båda sidor. Det genomförda försöket visade att deformationer i betong kan mätas baserat på texturen i betongens yta.



Figur 2 Jämförelse av vertikal deformation för två olika balkar mätt med maskinens LVDT och med en fast kamera.

Mätningar av deformation med rörlig kamera



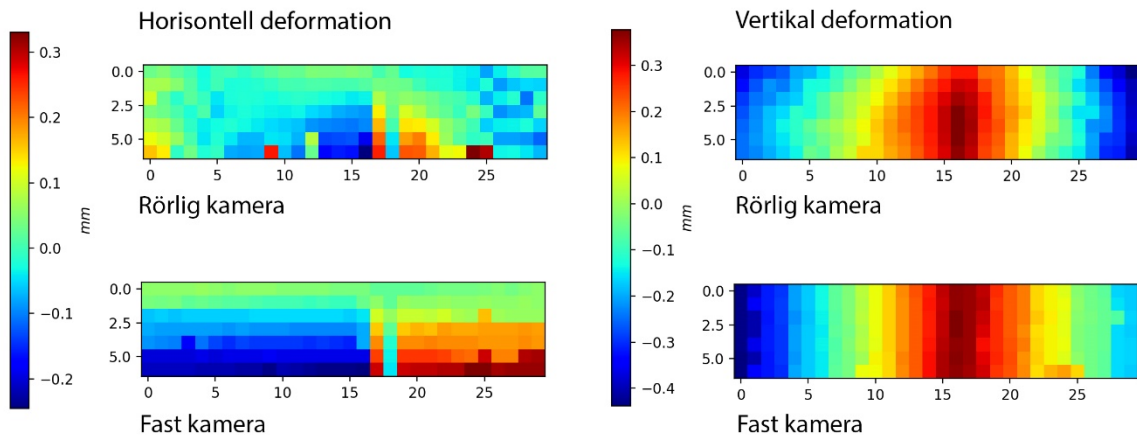
Figur 3 Uppställning för mätning med fast och rörlig kamera.

För att kontrollera med vilken noggrannhet en rörlig kamera kan mäta betongens deformation och spricktillväxten, genomfördes ett belastningsförsök i labbet på KTH. För att få en centrerad spricka med kontrollerad propagering användes en förspänd betongbalk som utsattes för trepunkts-böjning. Uppställningen för försöket visas i Figur 3. På balkens ena sida användes en fast monterad systemkamera och en mobilkamera. På den motsatta sidan användes en rörlig systemkamera och en horisontellt placerad LVDT. Under testet belastades balken i steg om cirka 1 kN. Efter varje laststeg togs tre bilder med de båda systemkamerorna där den rörliga kameran mellan varje bild flyttades enligt ett fast schema. I Figur 4 visas en jämförelse mellan mätningar av horisontella och vertikala deformationer vid en given belastning med en fast och en rörlig kamera. Mönstret och magnituden av deformationerna är i stort sett identisk för mätningar med en rörliga och fast kamera. Ett litet brus(fel) kan dock ses i mönstret mätt med den rörliga kameran..

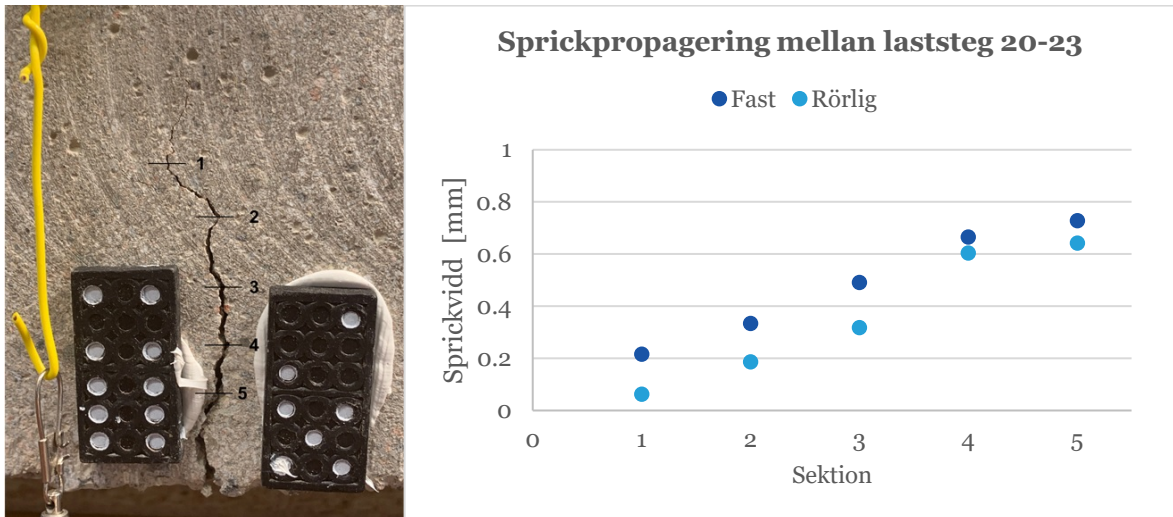
Till vänster i Figur 5 visas en bild av sprickan och markörerna tagen med en Iphone XS. I bilden visas även numrering av sektioner där sprickans bredd mättes. Till höger i Figur 5 visas sprickans propagering mellan laststeg 20 till 23 beräknat med en rörlig kamera (Iphone) och en fast kamera (Canon 5D Mark 2). I detta fall var den största respektive minsta skillnaden i beräknad sprickvidd mellan fast och rörlig kamera 0,15 mm (Sektion 1) respektive 0,05 mm (Sektion 4). I Figur 6 visas en jämförelse av sprickans propagering mellan laststeg 23 till 28. Den största och minsta skillnaden mellan rörlig och fast kameran var här 0,08 mm (Sektion 1) respektive 0,04 mm (Sektion 2). I Tabell 1 visas propagering av sprickan i Sektion 5 för tre olika laststeg beräknat med en fast och rörlig kamera. Resultaten visar att en bra noggrannhet kan erhållas med en rörlig kamera och jämförelsen mellan fotogrammetri och LVDT visar att metoden med hög noggrannhet kan mäta sprickans propagering. Mätningen av sprickans propagering med LVDT gjordes på motsatt sida som mätningarna med fotogrammetri vilket kan vara en av orsakerna till skillnaderna i sprickvidd mellan LVDT och fotogrammetri

Tabell 1 Jämförelse av sprickvidd mellan fast och rörlig kamera samt LVDT för tre olika laststeg.

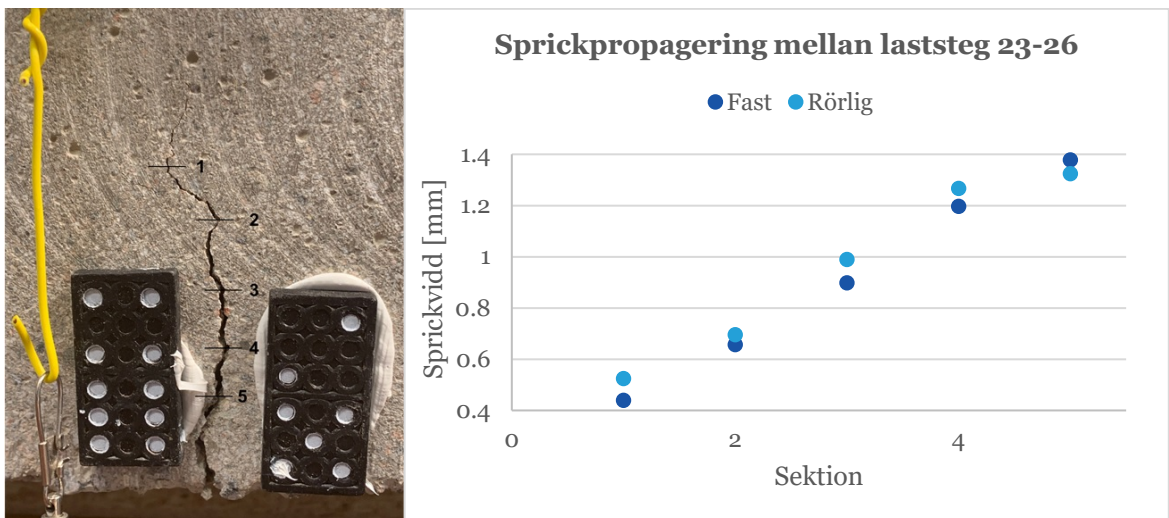
| Laststeg | Deformation [mm] | | |
|----------|-----------------------|-------------------------|-------|
| | Fast kamera Sektion 5 | Rörlig kamera Sektion 5 | LVDT |
| 20 - 23 | 0,728 | 0,642 | 0,656 |
| 23 - 26 | 1,378 | 1,325 | 1,386 |
| 23 - 28 | 1,919 | 1,927 | 1,900 |



Figur 4 Jämförelse mellan mätningar av horisontella och vertikala deformationer vid en given belastning med en rörlig och fast kamera.



Figur 5 Vänster figur visar bild av spricka tagen med Iphone XS och numrering av sektioner. Höger figur visar propagering av spricka mellan laststeg 20 till 23 beräknad med rörlig och fast kamera.

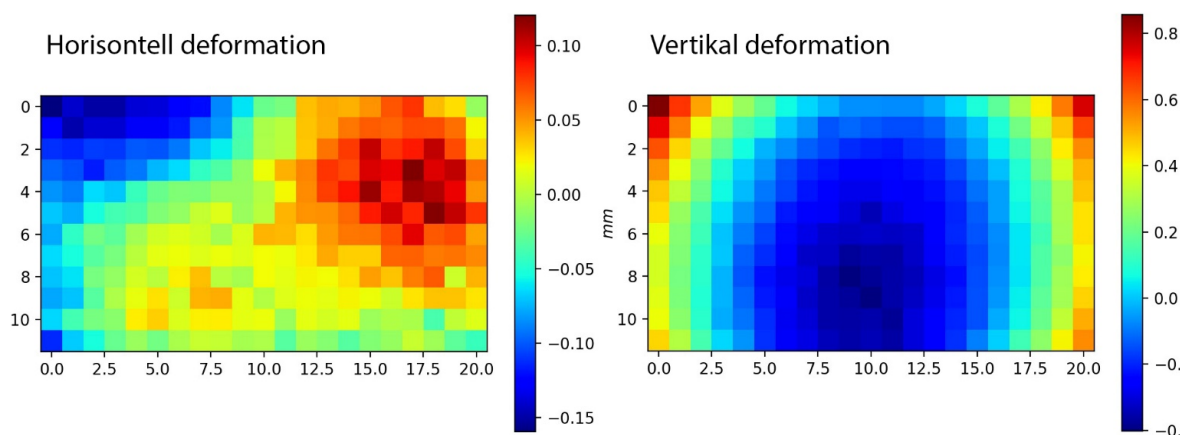


Figur 6 Vänster figur visar bild av spricka tagen med Iphone XS och numrering av sektioner. Höger figur visar propagering av spricka mellan laststeg 23 till 26 beräknad med rörlig och fast kamera.

Mätningar av deformation av sprutbetong i tunnelmiljö

För att kunna genomföra mätningar av sprutbetongens deformation i tunnelmiljö tillverkades ett kamerafäste av stålplåtar. Två beslag sattes i bergväggen med expanderbult, detta resulterade i ett ungefärligt avstånd mellan den studerade ytan och kameran på 5 meter. Den fotograferade ytan var 1151×767 mm vilket resulterade i en pixelstorlek på cirka 0,2 mm. I beslagen borrades ett antal hål som möjliggjorde att kameran kunde monteras i tre olika positioner. Kameran sattes fast i belaget med tre skruvar på vardera sidan. Dessa drogs åt i samma ordning vid varje tillfälle för att försöka få kameran monterad i samma vinkel. Kameran fjärrstyrdes med en laptop för att undvika rörelser i kameran när bilder togs. Dagen efter sprutning togs en första serie bilder och åtta veckor senare togs den sista serien.

I Figur 7 visas mätningar av horisontella och vertikala deformationer av sprutbetongen för position A1 mellan 2018-09-13 och 2018-10-17. Fotografierna av sprutbetongytorna för de båda datumen visas i Figur 8. Den redovisade deformationen är i mm och avser deformationen av hela sprutbetongens yta i Figur 8. Av denna figur framgår det att den vänstra delen av sprutbetongen är blöt och att dess utbredning har ändrats mellan de båda tillfällena. De redovisade horisontella deformationerna antyder att sprutbetongen i vänster och höger hörn har krympt respektive svällt. Detta skulle kunna förklaras med att sprutbetongen har torkat ut i vänster hörn och fuktats i höger hörn.



Figur 7 Mätningar av horisontella och vertikala deformationer av sprutbetong i tunnelmiljö mellan 2018-09-13 och 2018-10-17 med en rörlig kamera.

2018-09-13



2018-10-17



Figur 8 Fotograferad sprutbetongyta för mätningar av deformationer. Den vänstra halvan av sprutbetongen är blöt och i den högra figuren syns en ställinjal som användes som referens för skala.

Sammanfattning och diskussion

Det här projektet har visat att fotogrammetri har stor potential att kunna användas för att mäta deformationer i sprutbetong och propagering av sprickor. Innan en praktiskt tillämpningsbar fältmetod kan föreslås krävs mer arbete. Programvaran PY2DIC behöver utvecklas och testas vidare både i fält och i labb för undersöka hur kamerans rörelse och ytans krökning påverkar noggrannheten i mätningarna. Mer mätningar med fotogrammetri bör genomföras i fält och kompletteras med en annan lämplig mätmetod för att verifiera resultaten. Ett numeriskt verktyg bör utvecklas för att, baserat på mätdata, beräkna risken för att sprutbetongen spricker.

Slutsatser

Det här projektet har visat att mätningar av deformationer i sprutbetong innan sprickor uppstår är komplicerat och kräver metoder med hög noggrannhet och repeterbarhet. Att använda sig av mekaniska instrument som skjutmått eller mikrometerskruv är därför inte lämpligt. Anledningen till detta är att handhavandet av instrumenten leder till mätfel som är större än de deformationer som ska mätas.

Genomförda mätningar i labb med fotogrammetri har visat att sprutbetongens yta har tillräckligt bra textur för att mäta de deformationer som uppstår innan den spricker. Mätningar med hög noggrannhet kan genomföras med en vanlig systemkamera. De labbförsök som genomfördes med en rörlig kamera visade att noggrannheten i deformationsmätningarna är likvärdig med en fast uppställd kamera under förutsättningen att kamerans rörelser är inom några centimeter. Förutsättningarna att genomföra mätningar i fält skiljer sig från labbet och det råder vissa osäkerheter kring de resultat som togs fram i fältmätningarna. Metoden har potential att fungera men mer arbete krävs.

En metod för att på ett enkelt och snabbt sätt övervaka sprickors propagering i fält testade och utvärderades i labb med goda resultat. Markörer placerades på sprickans båda sidor och dess propagering kunde sedan mätas med en systemkamera och en mobilkamera. Denna teknik kan i fält användas för att kontrollera om vidden på sprickor ökar med tiden genom att fotografera sprickan vid olika tidpunkter. Markörerna används som referens för mätning av sprickans vidd samt för att beräkna kamerans position vid efterföljande bilder. Kameran behöver därför inte placeras på exakt samma ställe vid varje tillfälle vilket gör att insamlingen av data i fält kan göras snabbt. Förutom att kunna användas under byggtiden har tekniken goda möjligheter att kunna effektivisera och delvis automatisera sprickmätningen vid inspektionen av befintliga tunnlar