

BeFo



STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING  
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

# ULTRALJUDSMETOD FÖR TILLSTÅNDSKONTROLL AV BERGBULTAR I GRUVINDUSTRI OCH INFRASTRUKTURPROJEKT

Johan E. Carlson

Anton Jansson



STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING  
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

# **ULTRALJUDSMETOD FÖR TILLSTÅNDSKONTROLL AV BERGBULTAR I GRUVINDUSTRI OCH INFRASTRUKTURPROJEKT**

**Ultrasound method for condition monitoring of rock  
bolts in infrastructure projects and mining industry**

Johan E. Carlson, Luleå tekniska universitet

Anton Jansson, SWERIM AB

BeFo Rapport 234  
Stockholm 2022  
ISSN 1104-1773  
ISRN BEFO-R-234-SE



## FÖRORD

Det saknas idag metoder för att utföra tillståndskontroll på redan installerade bergbultar samt för övervakning av förändringar i bultars funktion över tid. Konsekvensen blir att äldre installationer av bergbultar antingen måste klassas utefter en okulär besiktning där endast synbara förändringar ligger till grund för statusbedömning, eller också måste samtliga bultar klassas som undermåliga. Detta innebär naturligtvis risk för missbedömningar, eller mycket stora kostnader för att ersätta bultarna.

Föreliggande forskningsrapportering utgör en mycket god grund för att utveckla en ultraljudsteknik och därtill en prototyp av ett instrument för tillståndskontroll av bergbultar, både vid nyinstallation och vid planering av underhåll av äldre installationer.

Arbetet har utförts vid Luleå tekniska universitet (LTU) och SWERIM; LTU och SWERIM har varit de huvudsakliga utförarna av det praktiska projektet, men med stöd av LKAB, Atlas Copco Industrial Technique, AFRY, BESAB AB och PreCast Technology AB (Pretec). De fälttest som ingått har genomförts i LKABs gruva i Malmberget.

Forskningsprojektet har haft stöd av en referensgrupp som bestått av Erik Stål, Urban Åkeson, Catrin Edelbro, Dirk Venter, Nils Rydén, Daniel Sandström, Per Tengborg och Patrik Vidstrand.

Forskningen har samfinansierats med Vinnova (genom programmet InfraSweden2030) och industriparterna.

Stockholm

*Patrik Vidstrand*



## **PREFACE**

There is currently a lack of methods for performing checks of the condition on already installed rock bolts and for monitoring changes in the bolt's function over time. The consequence is that older installations of rock bolts must either be classified according to an ocular inspection where only visible changes are the basis for status assessment, or all bolts must be classified as substandard. This naturally means the risk of misjudgments, or very large costs for replacing the bolts.

The present report forms a very good basis for developing an ultrasound technique and, in addition, a prototype of an instrument for the condition control of rock bolts, both during new installation and when planning the maintenance of older installations.

The work has been carried out at Luleå University of Technology (LTU) and SWERIM; LTU and SWERIM have been the main executors of the practical project, but with the support of LKAB, Atlas Copco Industrial Technique, AFRY, BESAB AB and PreCast Technology AB (Pretec). The included field tests have been carried out in LKAB's mine in Malmberget.

The research project has been supported by a reference group consisting of Erik Stål, Urban Åkeson, Catrin Edelbro, Dirk Venter, Nils Rydén, Daniel Sandström, Per Tengborg and Patrik Vidstrand.

The work performed has been co-financed together with Vinnova.

Stockholm

*Patrik Vidstrand*





## SAMMANFATTNING

Inom både gruvindustri och infrastrukturprojekt är tillståndskontroll av bergbultar av stort intresse. Det finns dedikerade mätbultar som kan installeras för att detektera och följa förändringar över tid. Det finns även metoder för att kontrollera ingjutningen av bultar vid installation. Däremot saknas idag mätmetoder för att följa tillståndet hos generiska bergbultar över tid, eller för att detektera avvikelser bland sedan tidigare installerade bultar.

I detta projekt utvecklas en metod baserad på ultraljud för att följa förändringar i mekaniska egenskaper över tid och för att kunna detektera avvikande bultar i en population av redan installerade bultar. Metoden bygger på en kort ultraljudspuls skickas in i bulten från den fria änden och att en reflekterat ljud från hela bultens längd samlas in. Detta fingeravtryck av bulten kan sedan jämföras bultar emellan, eller följas för en enskild bult över tid.

För att demonstrera principen visar vi hur uppmätta ultraljudssignaturer kan användas för att modellera hela dragprovskurvan (kraft mot töjning), från vila till brottgräns för en c: a 3 meter lång dynamisk bergbult.

**Nyckelord:** Tillståndskontroll, bergbultar, ultraljud, maskininlärning



## SUMMARY

In both the mining industry and infrastructure projects, condition monitoring of rock bolts is of great interest. There are dedicated measuring bolts that can be installed to detect and monitor changes over time. There are also methods to check the grouting of bolts during installation. There is, however, there are no available measurement technique for monitoring the condition of generic rock bolts over time, or for detecting deviations among previously installed bolts.

In this project, a method based on ultrasound is developed to monitor changes in mechanical properties over time and to be able to detect deviating bolts in a population of already installed bolts. The method is based on a short ultrasonic pulse being sent into the bolt from the free end and that the reflected sound from the entire length of the bolt is collected. This fingerprint of the bolt can then be compared between bolts, or monitored over time, for an individual.

To demonstrate the principle, we show how measured ultrasonic signatures can be used to model the entire stress-strain curve (force-elongation), from rest to breakage for an approximately 3 meter long dynamic rock bolt.

**Keywords:** Condition monitoring; rock bolts; ultrasound; machine learning



## INNEHÅLL

1. INTRODUKTION.....	1
1.1 Syfte och mål.....	1
1.2 Bakgrund.....	1
2. METOD.....	5
2.1 Övergripande strategi.....	5
2.2 Analysmetod.....	5
2.3 Mätutrustning.....	6
3. EXPERIMENT.....	9
3.1 Laboratorietester.....	9
3.2 Genomförbarhetstest i fält.....	9
4. RESULTAT.....	11
5. DISKUSSION.....	17
6. SLUTSATSER.....	19
7. REFERENSER.....	20



## 1. INTRODUKTION

### 1.1 Syfte och mål

Det saknas idag metoder för att utföra tillståndskontroll på redan installerade bergbultar samt för övervakning av förändringar i bultars funktion över tid. Konsekvensen blir att äldre installationer av bergbultar antingen måste klassas utefter en okulär besiktning där endast synbara förändringar ligger till grund för statusbedömning, eller så måste samtliga bultar klassas som undermåliga. Detta innebär antingen en risk för missbedömningar, eller mycket stora kostnader för att ersätta bultarna.

Detta projekt syftar till att utveckla metoder för detta samt en prototyp av ett instrument baserat på metoderna, lämpat för användning i fält. Fokus har legat på att utveckla själva analysmetoden baserad på kontrollerade laboratorieförsök, men på fullängdsbultar av produktionstyp. I laboratorieförsöken fokuserade vi på kontrollerade mätningar av dragbelastning, men i förlängningen är all övervakning av all typ av förändring i bultarnas mekaniska egenskaper av intresse. Fälttesterna syftade i detta läge till att verifiera instrumentets funktion under fältmässiga förhållanden.

En ny mätmetod möjliggör uppbyggnaden av databaser där förändringar i bultars egenskaper lagras över tid och på så sätt underlätta planering och utförande av underhåll.

### 1.2 Bakgrund

I ett tidigare projekt (Lundin 2017) utvecklades en ultraljudsmetod för bestämning av spänningsnivå i bergbultar. Projektet visade att den utvecklade metoden kan användas för att mäta spänningsnivå i bergbultar, utan att i förväg veta deras längd (Carlson och Lundin 2015). Vid avslut av projektet konstaterades att det finns potential för att med hjälp av ultraljud bestämma även andra egenskaper än spänningsnivå. I framtiden skulle ett mätinstrument för bestämning av spänningsnivå således kunna tillhandahålla även annan typ av diagnostik av bultar. Resultat från labbtest visade att metoden fungerar för att bestämma den kraft som verkar på bulten. Resultat från fälttest visade att metoden kan hämta in nödvändiga data för att kunna mäta spänningsnivå i bultar med kända materialegenskaper, även under fältmässiga förhållanden. En väsentlig nackdel med den metoden var dock att den förutsatte att man kunde

mäta gångtiden för enskilda ultraljudsekon fram och tillbaka genom en bult. Detta är i praktiken endast möjligt om bulten är plankapad i bortre änden (inne i berget). Många bulttyper som används idag ser inte ut så. En annan nackdel var att systemet som användes för att generera ultraljudspulserna var både stort, tungt och i behov av extern strömförsörjning. Just detta bedömdes dock vara något som kan lösas genom viss systemutveckling.

I ett efterföljande projekt (Carlson, et al. 2018) studerades därför möjligheten att använda ett lågeffektsystem som i stället för att skicka en kort, kraftig ultraljudspuls, skickar en längre, men väldefinierad ultraljudssekvens. Idén lånades från kommunikationsteorin, där kända symboler, så kallade pilotsymboler först skickas, för att mottagaren ska kunna göra en uppskattning av hur kanalen ser ut. I fallet med bergbultar är denna kanal ett fingeravtryck av den vågutbredning som sker i bulten. Resultaten visade att förändringar i denna kanal gick att koppla till förändringar i belastning på ett kortare segment av en bult. Vid försök på fullängdsbultar visade det sig dock att signalstyrkan var för låg för att kunna övervaka förändringar i hela bultens längd.

I det här projektet, som är en uppföljning av (Carlson, et al. 2018) har vi därför återgått till att studera hur ett konventionellt ultraljudssystem som sänder ut korta pulser, kan användas för att följa förändringar i mekaniska egenskaper hos bergbultar. Fokus har varit på kontrollerade försök i laboratoriemiljö, men utrustningen har även funktionstestats i fält, vid LKABs anläggning i Malmberget.

På marknaden finns idag ett instrument, Rock Bolt Tester (RBT) (Krekula, et al., 2021, Stepinski, et al. 2014 och Stepinski och Mattsson 2016), vilket är en vidareutveckling av ett äldre instrument (Boltometern). Gemensamt för bägge dessa är att de primärt syftar till att analysera ingjutningens kvalitet i samband med installation av bultarna. Syftet med RBT är alltså inte på att övervaka förändringar i bultarna över tid, vilket varit målet med detta projekt. Det finns idag inga kommersiellt tillgängliga mätinstrument och metoder för att detektera avvikelser och förändringar i äldre installerade bultar, även i de fall då materialdata saknas. Behovet av sådana metoder är identifierat sedan tidigare (Lindblom 2012).

Ett annat sätt att övervaka förändringar i bergförstärkningen snarare än i varje enskild bult är att installera dedikerade mätbultar på lagom avstånd från varandra. Det finns flera företag och tekniker för detta, men som exempel kan



ges The IoT Rock Bolt av ThingWave AB (Lindström, et al. 2019). Just deras mätbultar har inte använts i detta projekt, men fälttesten nyttjades andra mätbultar som installerats i nära anslutning till de vanliga bergbultarna som testades med ultraljudsmetoden.



## 2. METOD

### 2.1 Övergripande strategi

Ultraljud är en mekanisk våg och som sådan kommer dess egenskaper att påverkas av förändringar i mekaniska egenskaper hos det undersökta mediet. I fallet med bergbultar, som kan ses som långa vågledare, kommer en kort ultraljudspuls som sänds in genom den fria änden, att fortplanta sig genom bulten på ett ganska komplext sätt. Att med fysikaliska modeller beskriva hur denna vågutbredning beter sig är komplicerat och det finns inga enkla slutna uttryck som beskriver vad som sker. För att ta fram bra modeller för vågutbredningen kan man arbeta med diverse Finita-Element-Metoder (FEM). Dessa är dock mycket beräkningskrävande och mätproblemet, dvs. att studera mekaniska förändringar i bultarna, är att betrakta som ett inversproblem till det redan svåra modelleringsproblemet. Mot bakgrund av detta är det sannolikt inte en framkomlig väg att basera en mätmetod på detaljerade fysikaliska modeller.

Vi har därför valt att angripa problemet som ett datadrivet maskininlärningsproblem, där vi genom att utföra kontrollerade försök kan träna upp en statistisk modell som beskriver kopplingen mellan ultraljudssignaturer och mekaniska förändringar.

### 2.2 Analysmetod

Den metod som valts för analys av resultaten kallas för PLS-regression (PLSR), där PLS står för *Partial Least-Squares* (Wold 1982), en metod för väglett lärande (eng. supervised learning) som använts mycket inom kemometri och andra experimentella vetenskaper. Det är en multivariat kalibreringsmetod där man utnyttjar korrelation som finns mellan något man kan observera och det man vill uppskatta. I detta fall består observationerna av ultraljudssignaturer som reflekteras från bergbulten och data från dragprovningens utrusningen om vilken kraft bulten belastas med samt hur mycket den töjts ut. Till skillnad från en del moderna metoder baserade på neuronät leder PLSR till en linjär modell, så att

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{A}$$

där  $\mathbf{Y}$  är det vi vill modellera,  $\mathbf{X}$  är en matris vars rader innehåller data från de mätningar som gjorts och  $\mathbf{A}$  är den regressormatris vi behöver bestämma genom att göra kontrollerade kalibreringsförsök. I vårt fall är varje rad i  $\mathbf{X}$  ultraljudsdata

samlade för en given dragbelastning på bulten. Exakt vad beskrivs i mer detalj senare. Motsvarande rad i matrisen  $\mathbf{Y}$  innehåller den uppmätta belastningen (i kN) och den resulterande töjningen (i mm) som provutrustningen levererar. Om en bult sträcks i  $N$  steg, kommer matriserna  $\mathbf{X}$  och  $\mathbf{Y}$  att ha  $N$  rader. Matrisen  $\mathbf{Y}$  har två kolumner, då dessa motsvarar kraft och töjning. Hur många kolumner  $\mathbf{Y}$  har beror på hur långa ultraljudssignaturer som samlas in och hur förbehandlingen sker.

För en vanlig minsta-kvadratskattning skulle matrisen  $\mathbf{A}$  bestämmas som

$$\hat{\mathbf{A}}_{LS} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y},$$

och motsvarande skattning av  $\mathbf{Y}$  blir då

$$\hat{\mathbf{Y}}_{LS} = \mathbf{X} \cdot \hat{\mathbf{A}}_{LS}$$

I PLSR bestäms i stället matrisen  $\mathbf{A}$  så att korrelationen mellan det vi mäter ( $\mathbf{X}$ ) och det vi vill modellera ( $\mathbf{Y}$ ) maximeras. Detaljer för hur detta kan göras finns beskrivet i till exempel (Wold, et al., 2001) och mer specifikt för ultraljud i arbeten av Carlson et al. [10,11].

För att en sådan här metod ska fungera bra behöver man se till att  $\mathbf{X}$  innehåller data som påverkas av det vi vill mäta, men inte påverkas av faktorer som är svåra att kontrollera. Då den uppmätta ultraljudssignalen påverkas mycket av till exempel den akustiska kopplingen mellan ultraljudsgivaren och bulten, är det därför viktigt att analysmetoden inte beror av absolut amplitud (signalstyrka). En annan faktor som är viktig i all ultraljudsteknik är temperaturvariationer, eftersom ljudhastigheten är kraftigt temperatur-beroende.

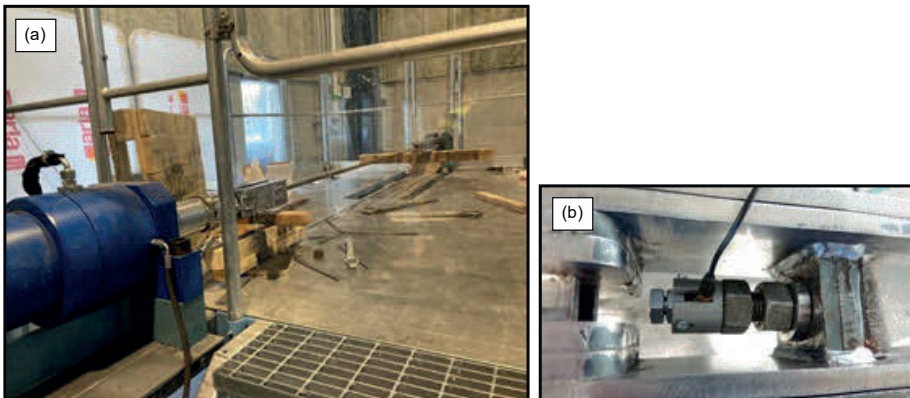
I det här arbetet har vi därför valt att låta raderna i  $\mathbf{X}$  vara effektspektrum av normaliserade versioner av insamlade ultraljudssignaturer. Detta mått är invariant mot variationer i ljudhastighet, och normaliseringen innebär att absolut signalstyrka inte har någon betydelse. I PLSR-algoritmen ingår även att man medelvärdescentrerar och normaliserar data. Detta innebär ytterligare stabilitet mot faktorer vi inte kan påverka.

### 2.3 Mätutrustning

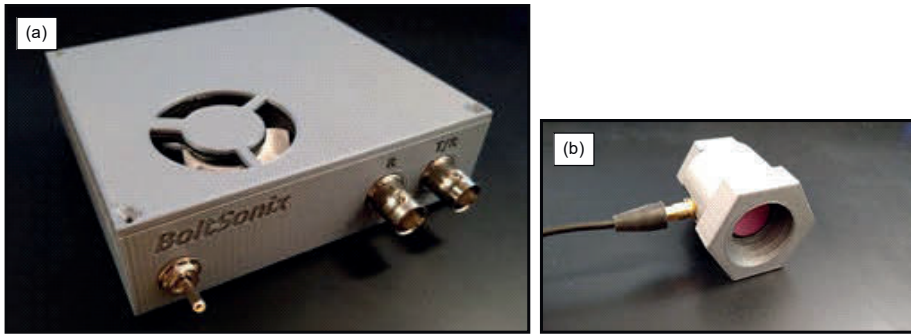
Utrustningen bestod av kommersiellt tillgängliga ultraljudsgivare från Olympus Videoscan-serie (modell V106-RM) med en centerfrekvens på 2,25 MHz. Även givare med en centerfrekvens på 1 MHz och 3,5 MHz utvärderades, men 2,25

MHz visade sig ge bästa kompromiss mellan mätdjup (bultlängd) och kontrast (känslighet för mekaniska förändringar i bulten) Dessa kopplades in till systemprototypen som konstruerats i projektet (se Figur 2).

Systemet kan excitera ultraljudsgivaren med korta pulser med en spänning i intervallet 3–230 V. För fullängdsbultar exciterades alltid givaren med 230 V. Den reflekterade ultraljudssignalen förstärktes med 30 dB (systemet tillåter 0–60 dB, beroende på bultens längd). och digitaliserades med en samplingsfrekvens på 40 MHz med 12 bitas upplösning. Efter digitaliseringen medelvärdescentrerades signalen samt normaliserades så att den maximala signalstyrkan alltid hade värdet 1. Anledningen till detta är att absolut amplitud i stor grad påverkas av den akustiska kopplingen mellan ultraljudsgivare och bult, något som är svårt att kontrollera.



**Figur 1:** Fotografi av försöksuppställningen vid SWERIM i Luleå. Figur (a) visar dragriggen, med en ca 3,2 m lång bult monterad. Figur (b) visar den friliggande bultänden med en ultraljudsgivare monterad.



**Figur 2: Prototyp av det utvecklade mätsystemet (a) och prototyp av givarfäste för E-bulten.**

### 3. EXPERIMENT

Merparten av experimenten i den här studien är genomförda som kontrollerade laborieförsök. Utrustningen har dock även funktionstestats i fält, vid LKAB:s gruva i Malmberget.

#### 3.1 Laborietester

Laborietester genomfördes vid SWERIMs anläggning i Luleå, där dragtest på fullängdsbultar kunde genomföras. För de aktuella testerna användes en dynamisk, så kallad *E-bult*, som används av LKAB. Tester genomfördes på både ingjutna och friliggande bultar och det kunde snabbt konstateras att ingjutningen inte signifikant påverkar ultraljudssignalerna för den här typen av bultar. Förklaringen till detta är att vidhäftningen mellan bult och cement i princip bara är vid ankarpunkterna, då bultens släta yta släpper från cementet så snart den börjar ta last och töjas. Resterande försök gjordes därför, av praktiska skäl, bara på friliggande bultar.

Testerna gick till så att bulten först spändes fast i dragriggen, Figur 1(a) och förspändes precis så att den satt stadigt fast men utan att egentligen ta någon last. Därpå monterades ultraljudsgivaren på den friliggande änden av bulten, som i Figur 1(b). I ett första test drogs en bult till brott, vilket inträffade vid c:a 220 kN. De riktiga testerna genomfördes sedan med en dragbelastning från 0 till c:a 200 kN. Detta för att inte riskera att bulten skulle gå av och därmed riskera att ultraljudsgivaren slås sönder. I början av testerna, när bulten befann sig i det elastiska området genomfördes en ultraljudsmätning för varje 10 kN ökad last. Vid sträckgränsen, c:a 180 kN, ändrades mätproceduren så att ultraljudsdata i stället samlades in som funktion av töjningen, var femte millimeter. Totalt ledde detta till 35 mätpunkter. Mätningarna upprepades för två bultar av samma typ. Data från den ena bulten användes sedan för att träna in PLSR-modellen för att gissa kraft och töjning från ultraljudssignaturen. Data från den andra bulten användes sedan som test. Resultaten redovisas i nästa avsnitt.

#### 3.2 Genomförbarhetstest i fält

För att verifiera att metoden på sikt kan användas under fältmässiga förhållanden har mätningar utförts på samma typ av bergbultar (LKAB:s *E-bult*) hos LKAB i Malmberget, både i maj 2021 och i december 2021. Mätningarna

genomfördes under jord, vid samma provplats och i anslutning till de vanliga bergbultarna fanns även dedikerade mätbultar installerade (Lindström et al. 2019).

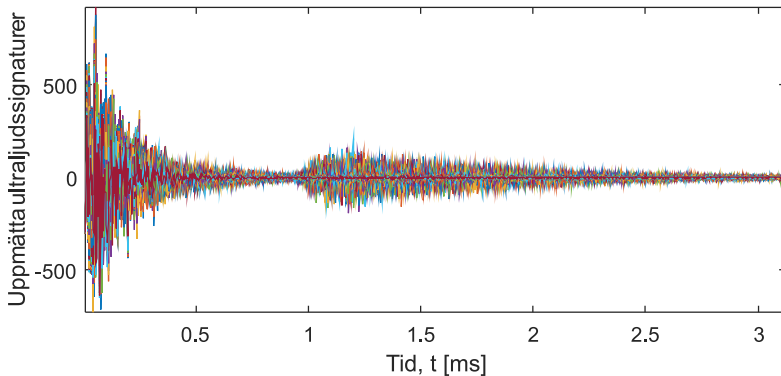
Då det inte finns några referensmätningar på hur mycket last bultarna i fält tar så går det inte att rapportera några absoluta siffror kring dessa. Det är inte heller troligt att bultarna utsatts enbart för en longitudinell dragkraft utan mer sannolikt påverkas de av en kombination av drag- och skjuvkrafter. Om man applicerar den modell som kalibrerats genom dragtesterna hos SWERIM får man därför missvisande resultat. Det man däremot ser är att de bultar där vi observerar störst förändring mellan provtillfällena, även är närmast de dedikerade mätbultar som visar störst förändring.

Precis som väntat är det också svårare att få till en bra akustisk koppling mellan ultraljudsgivare och bult i fält än vid laboratorieförsök.



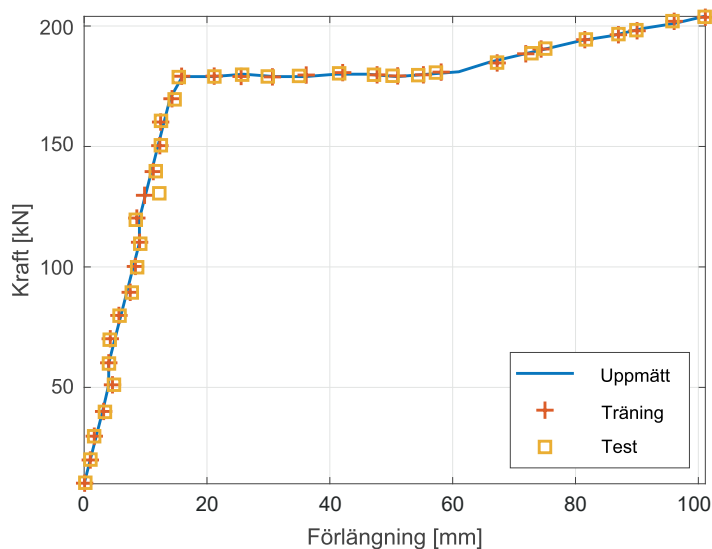
## 4. RESULTAT

I det här avsnittet visar vi resultat av de experiment som beskrivits ovan. Figur 3 visar hur uppmätta ultraljudssignaturer ser ut från en bergbult vid olika belastning (dragprovning enbart). Bulten var ca 3,2 m lång och givet att ljudhastigheten i materialet är  $c: a$  5,8 km/s så tar det ungefär 1–1,2 ms för ljudet att nå den inre änden (längst in i berget) av bulten. I Figur 3 ser vi att något händer strax innan 1 ms, vilket motsvarar den position där bulten är förankrad i ingjutningen i berget. Då ljudet fortsätter studsas fram och tillbaka inne i bulten, sparas dock en betydligt längre sekvens med data (lite drygt 3 ms, enligt Figur 3). När man sedan utsätter bulten för en dragbelastning ändras signalformen. Från figuren är det svårt att se att förändringen är systematisk, men resultaten i Figureerna 4–6 visar att så är fallet.



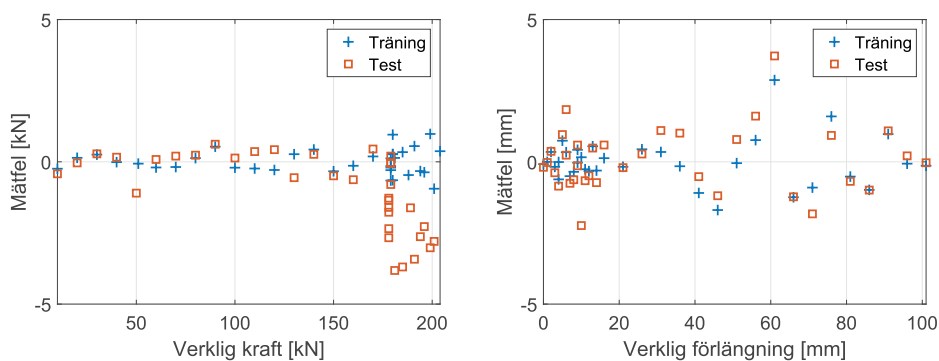
**Figur 3: Exempel på ultraljudssignaturer uppmätta vid olika dragbelastning på en E-bult. De olika färgerna motsvarar olika last.**

Figur 4 visar resultatet av PLSR-algoritmen. Den blå heldragna linjen är data från dragtestriggen och får anses vara *den samma* belastningen och töjningen av bulten, de röda + är resultatet av att modellera kraft och töjning med PLSR, för träningsdata. Den resulterande modellen testades sedan med ultraljudssignaturer liknande de i Figur 3 fast för en ny bult. De orange kvadraterna i Figur 4 visar med andra ord en prediktion av töjning och kraft baserat på en helt ny uppsättning data, uppmätta på en annan bult. Vid första anblick ser resultaten mycket bra ut, men låt oss studera modellfelen för att avgöra hur bra det egentligen är



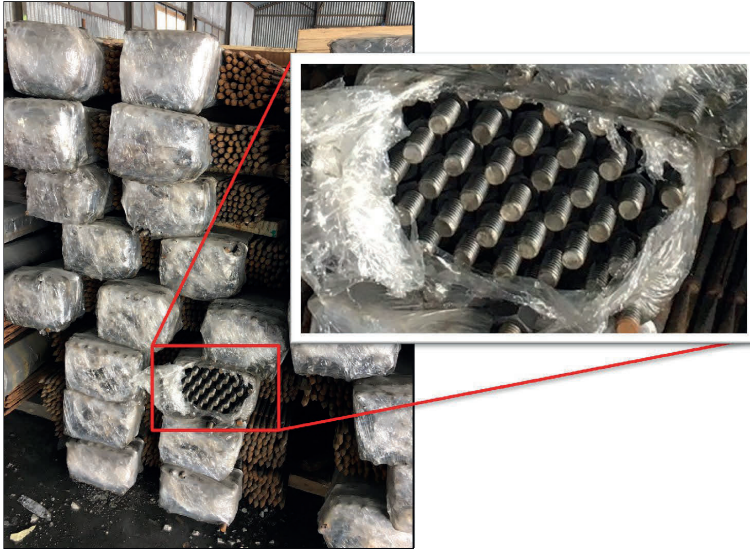
**Figur 4: Resultat av dragprovning på E-bult. Data från dragprovningsriggen (blå heldragen), resultat av att matcha träningsdata mot dragprovdata (röda +) samt resultat av att testa modellen vid dragning av en annan bult av samma typ (orange fyrkant).**

Figur 5 visar felet mellan uppmätt (blå heldragen linje) och modellerade värden, för både träningsdata och testdata. I den högra figuren ser vi felet i mätningen av dragkraften (i kN). Man kan notera att det är svårare att modellera kraften i testbulten när bulten börjar deformationshärda vid c: a 175–180 kN. Felet är dock bara c: a -4 kN, vilket motsvarar ett procentuellt fel på bara 2,0–2,5 %. För töjningen är felet något mer jämt distribuerat över mätintervallet, men det är tydligt att det är svårare att uppskatta töjningen i det plastiska området än i den elastiska regionen. Maximalt fel är dock även här procentuellt sett ganska lågt, c: a 4 mm, vid en töjning på 60 mm, vilket motsvarar c: a 6,7 %



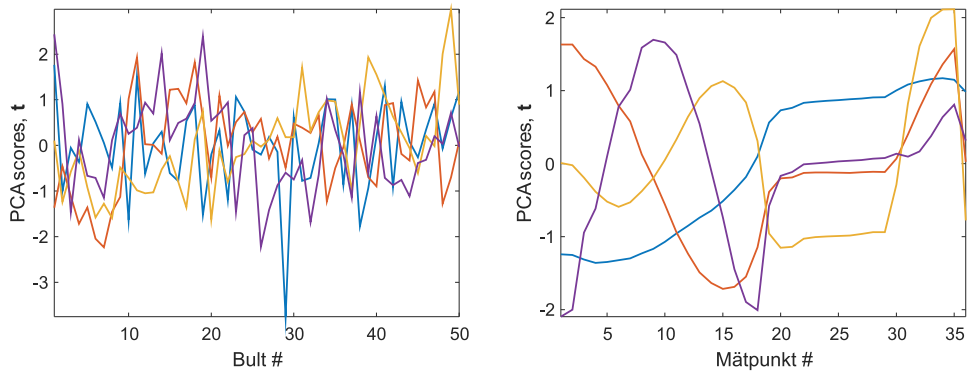
**Figur 5: Modellfel både för träningsdata och för testdata (två olika bultar av samma typ). Till vänster felet i modellerad kraft [kN]. Till höger, felet i modellerad töjning [mm].**

Nästa viktiga fråga att besvara är om den variation man ser i ultraljudssignaturerna för varierande belastning är större än den naturliga variationen man får mellan bultar i vila. För att testa detta jämfördes data från alla 35 mätpunkterna vid dragprovningsen med data från 50 bultar i vila (Figur 6).



**Figur 6: Bultar i vila i ett förråd hos LKAB. Mätningar på dessa genomfördes för att få en uppfattning om den naturliga spridningen bultar emellan.**

Figur 7 visar resultatet av en principalkomponentanalys (PCA) data från dessa mätningar. I vänstra figuren ser vi score-värden för de fyra första principalkomponenterna (som tillsammans förklarar drygt 90% av variationen i data) från data från bultarna i Figur 6 och i den högra figuren ser vi motsvarande för resultatet från de 35 mätpunkterna på dragprovningsskurvan. Det är tydligt att spridningen mellan bultarna i vila är mycket mer *slumpmässig* än spridningen som funktion av dragbelastning. Mot bakgrund av detta är bedömningen att känsligheten i metoden är tillräckligt stor och att den observerade effekten på ultraljudssignaturen, som funktion av belastning, är signifikant.



**Figur 7** Resultat av en principalkomponentanalys av ultraljudssignaturer från bultar i vila (vänster) och vid olika dragbelastning på en bult (höger).



## 5. DISKUSSION

Även om resultaten i den här studien är lovande så återstår en hel del arbete. Vi har till exempel enbart studerat dragbelastning i laboratoriemiljö. För att kunna diagnosticera fler olika tillstånd hos redan installerade bultar behöver modellerna kalibreras (tränas) med data från mycket mer omfattande laboratorieförsök. Exempel är belastning i dragriktningen, men verkande lokalt, på en kortare del av bulten. En hög last som enbart påverkar ett kortare avsnitt av bulten innebär en större risk för att bulten ska slitas av och därför är ett sådant scenario viktigt att kunna detektera. Även andra typer av laster, som till exempel skjuvbelastning är av vikt, då sprickbildningar i berget kan leda till att olika skikt glider och på så sätt riskerar *klippa av* bulten om belastningen i tvärsriktningen blir för stor. I många lägen är till och med en uppskattning av bultens längd en utmaning. Detta beroende på att bultens inre ände inte är parallell med den friliggande änden och därmed inte resulterar i något distinkt eko.

Det finns även ytterligare utmaningar kvar att adressera för att kunna utveckla ett tillförlitligt mätinstrument. Kopplingen, dvs den akustiska kontakten, mellan ultraljudsgivare och bult påverkar den uppmätta ultraljudssignaturen och det därför viktigt att aningen kunna kontrollera den kopplingen på ett effektivt sätt, eller basera analysmetoden på egenskaper som inte är känsliga för variationer i denna koppling. I nuvarande projekt har vi försökt minimera inverkan av den akustiska kopplingen genom att helt enkelt normalisera uppmätta signaler så att inte absolut signalstyrka påverkar analysen. Här finns dock mer att göra och framtida projekt bör innehålla studier av vilka egenskaper i data som ska tjäna som indata till maskininlärningsalgoritmerna (sk. *physics-informed machine learning*).

En annan viktig aspekt för att metoden ska bli praktiskt användbar är att handhavandet blir effektivt. Nuvarande konstruktion är ultraljudsgivaren gängas på bultänden är alltför tidskrävande för att vara rimligt när man behöver kunna inspektera ett stort antal bultar på kort tid. I detta arbete behöver även kopplingsmediet mellan givare och bult undersökas. I detta projekt har ett kopplingsmedium för skjuvvågor används, inte för att vi nyttjat skjuvvågor vid mätningarna utan för att kopplingen blir stabilare över tid än om man använder vatten eller glycerin, vilket är vanligt vid mätning med tryckvågor. Problemet är dock att om temperaturen sjunker så blir den här typen av relativt viskösa kopplingsmedium ganska hårda och därför svåra att applicera.

Slutligen, mätning av belastning eller annan påverkan i absoluta tal är komplicerat. I ett framtida projekt bör man därför studera om man utifrån en större population av bultar kan avgöra om det finns bultar eller zoner av bultar där det avviker kraftigt. En sådan metod skulle vara till stor hjälp vid planering av både underhållsarbete och av mer detaljerade undersökningar av installationerna.



## 6. SLUTSATSER

Vi har här presenterat resultaten av ett projekt som syftar till att utveckla en mätmetod baserad på ultraljud för tillståndskontroll av bergbultar i såväl gruvindustri som i infrastrukturmiljöer såsom trafiktunnlar för väg och järnväg. Metoden är baserad på att en kort ultraljudspuls sänds in från den fria änden av bulten och att reflekterat ultraljud registreras. Den uppmätta signalen kan ses som ett fingeravtryck av bultens tillstånd och metoden baseras på att studera hur detta fingeravtryck ändras som om bulten utsätts för en mekanisk last.

Vi har visat att för en dragbelastning i laboratoriemiljö, kan ultraljudssignaturen användas för att med god noggrannhet bestämma både last och resulterande töjning i en dynamisk.

Metoden har utvecklats i laboratoriemiljö, men funktionen och instrumentet har testats i fält, för att säkra att tillförlitliga mätdata kan inhämtas även under mer realistiska förhållanden.

## ERKÄNNANDEN

Detta forskningsprojekt har finansierats gemensamt av Vinnovas program InfraSweden2030 (projekt 2019–01155), Stiftelsen Bergteknisk forskning (BeFo-projekt 421) och våra industriella parter, LKAB, Atlas Copco Industrial Technique, BESAB AB och AFRY AB och PreCast Technology.

Ett stort tack riktas också till projektets referensgrupp, med representanter från Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo), Itasca Consultants, Boliden AB, Lunds universitet, Trafikverket och Epiroc.

## 7. REFERENSER

- Carlson, J. E., Andrén, E., Mohamad, M., van de Beek, J. 2018. "Monitoring Changes in Mechanical Properties of Rock Bolts Using a Low-Power Coded-Excitation Scheme", in *Proc. of 2018 IEEE Int. Ultrason. Symp.* (Kobe, Japan).
- Carlson, J. E., Carlson, R., 2006., "Prediction of molar fractions in two-component gas mixtures using pulse-echo ultrasound and PLS regression," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr.*, vol. 53, nr. 3, sid. 606–613.
- Carlson, J. E., Jansson, A., 2021. "Modeling of the Stress-Strain Relationship of Rock Bolts from Ultrasound Data", in *Proc. of IEEE Int. Ultrason. Symp.* (Xi'an, China), Sept. 11–16.
- Carlson, J. E., Lundin, P., 2015. "Measurement of the clamping force applied by load-bearing bolts using a combination of compression and shear ultrasonic waves," in *Proc. of 2015 IEEE Int. Ultrason. Symp.* (Taipei, Taiwan).
- Krekula, S., Lanaro, F., Stepinski, T., 2021. "Development of the Instrument RBT With Respect to Rock Bolt Types PC- And CT-Bolt And Similar Combination Bolts", BeFo Rapport 215.
- Lindblom, U., 2012. "Tidseffektivt underhåll av trafik tunnlar", BeFo Rapport 119, Stiftelsen bergteknisk forskning,
- Lindblom, U., 2012. "Underhållskostnader för bergtunnlar i ett livslängdsperspektiv", BeFo Rapport 120, Stiftelsen bergteknisk forskning,
- Lindström, J., Eliasson, J., Kyösti, P., Andersson, U., 2019. "Toward predictive maintenance of walls in hard rock underground facilities: IoT enabled rock bolts," in *Proc. of the I-ESA Conferences 9. Springer*, sid 319–329.
- Lundin, P. 2017. "Utvärdering av strukturkomponenter", BeFo rapport 164. Stiftelsen bergteknisk forskning,
- Stepinski, T., Mattsson, K.-J., Ekenbro, B. 2014. "New Instrument for Rock Bolt Inspection Using Guided Waves", in *Proc. of 11th European Conference on Non-Destructive Testing, ECNDT 2014* (Prague, Czech Republic), October 6-10.
- Stepinski, T., Mattsson, K.-J., 2016. "Rock Bolt Inspection by Means of RBT Instrument", in *Proc. of. 19th World Conference on Non-Destructive Testing* (Munich, Germany), June 13-17.

Wold, H., 1982. *Systems Under Indirect Observation*, Vols I, II. Amsterdam: *North Holland*.

Wold, S., Sjöström, M., Eriksson, L., 2001. "PLS regression: A basic tool of chemometrics," *Chemometrics Intell. Lab. Syst.*, vol. 58, sid 109–130.







Box 5501  
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org  
Besöksadress: Storgatan 19, Stockholm

ISSN 1104-1773