

DRIFTSÄTTNING AV EN 5 MN SKJUVTEST- UTRUSTNING OCH UTVÄRDERING AV REPLIKOR I DIREKTA SKJUVTESTER

Jörgen Larsson

DRIFTSÄTTNING AV EN 5 MN SKJUVTESTUTRUSTNING OCH UTVÄRDERING AV REPLIKOR I DIREKTA SKJUVTESTER

**Commissioning of a 5 MN shear test
equipment and evaluation of replicas in
direct shear tests**

Jörgen Larsson, RISE Research Institutes of Sweden
KTH Kungliga Tekniska Högskolan

FÖRORD

Dimensionering avseende bergmekaniska parametrar hos bergmassan görs i dagsläget normalt utifrån empiriska samband från fältfarenheter och enkla tester. Det finns emellertid indikationer på att parametrarna som beskriver exempelvis skjuvhållfastheten under vissa omständigheter varierar med storleken. För att undersöka denna skaleffekt krävs att experimentella skjuvtester genomförs på olika skalor under kontrollerade former i laboratoriemiljö. Numeriska modeller kan sedan valideras mot skjuvtesterna för att därefter användas för att beräkna bergmassors hållfasthet.

En annan utmaning är det faktum att alla bergsprickor är unika, vilket innebär att det inte är möjligt att genomföra upprepade parameterstudier för framtagning av hållfasthetskriterier. Parameterstudier kan emellertid möjliggöras genom tillverkning av kopior av sprickyterna, så kallade replikor, men hur väl representerar replikor verkligheten?

Innehållet i det arbete som rapporteras här består av två delar. Den första delen beskriver framtagandet av en skjuvtestutrustning för större provstorlekar i kombination med höga nivåer på spänningar. Den andra delen omfattar en utvärdering av hur väl replikor representerar bergsprickor genom systematiska jämförelser mellan resultat från skjuvtester på bergprov respektive på motsvarande replikor.

Forskningen som rapporteras är samfinansierad av BeFo och RISE och har genomförts i samverkan med ett annat projekt POST, som finansierats av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) och NWMO (Nuclear Waste Management Organization).

Referensgruppen som bistått projektet bestod av Axel Bolin, Christer Andersson, Mattias Roslin, Per Tengborg och Thomas Wettainen; deras in-kind arbete har bidragit till de lyckade resultaten.

Stockholm

Patrik Vidstrand

SAMMANFATTNING

Bergsprickor påverkar stabiliteten i bergmassor, vilket i sin tur inverkar på vilka laster berganläggningar skall dimensioneras för. Prediktion av bergsprickors skjuvhållfasthet görs bland annat med hjälp av brottkriterier, vilka utvecklas med hjälp av skjuvtester under kontrollerade förhållanden i laboratoriemiljö. Det finns indikationer på att storleken på provobjektet påverkar skjuvhållfastheten, den så kallade skaleffekten. Osäkerheten kring hur resultaten från tester på bergprov skall tolkas är dock stora. Det går inte att uttala sig om i vilken mån det är skillnader i storlek på sprickytan eller det faktum att varje sprickyta är unik som inverkar på resultaten. Som ett alternativ används därför istället avgjutningar av bergsprickor återkommande i olika studier. Även i detta fall är osäkerheterna kring hur resultaten skall tolkas stora, eftersom det saknas dokumentation kring hur väl avgjutningarna representerar bergsprickor och hur stor spridningen mellan avgjutningarna är.

För att tillföra ny kunskap om skaleffekten har därför en ny skjuvtestutrustning tagits fram som gör det möjligt att utföra tester på storlekar i kombination med spänningsnivåer som inte tidigare varit möjliga att genomföra (upp till 400 x 600 mm med 5 MN i både skjuv- och normallast). Provuppställningens funktionalitet har utvärderats med godkänt resultat. Specifikt har ett tillvägagångssätt för att kompensera för testsystemets normalstyvhet under randvillkoret CNS (konstant normalstyvhet) tagits fram. Med hjälp av detta tillvägagångssätt reduceras avvikelserna från den nominella normallasten, som annars blir för låg. Trots provuppställningens höga systemnormalstyvhet på 11 326 kN/mm kan det påvisas att drygt 9 % för låg normallast läggs på vid 4.2 MN och att detta kan kompenseras för med det framtagna tillvägagångssättet.

Möjligheten att använda parameterstudier i utvecklandet av skjuvhållfasthetskriterier är potentiellt till stor nytta, men kan inte tillämpas på bergsprickor eftersom de är unika. Istället kan avgjutningar av sprickytor, så kallade replikor, användas. En förutsättning är dock att ha kännedom om hur väl replikorna representerar bergsprickor. Därför har två parametrar baserade på skanningdata för geometrisk kvalitetssäkring av replikor tagits fram. Standardavvikelsen för avvikelserna för skanningpunkterna mellan sprickytorna på berg och replikor, σ_{mf} , visade sig representera avvikelser i morfologi (formen på själva sprickytan). Det kan påvisas att det går att reproducera replikor med $\sigma_{mf} < 0.06$ mm. Den andra parametern beskriver replikatets avvikelse relativt bergprovets i förhållande till läget i provhållaren. Genom projektion av normalen till replikatets sprickytas bäst anpassade plan på motsvarande plan för bergprovet erhålls en vektor betecknad V_{Hp100} , som beskriver avvikelserna både med avseende på storlek och riktning. Avvikelserna var inte stora sett till belopp, men spridningen stor, uttryckt i grader [0.02° , 0.21°]. Slutsatsen för dessa tester, där överdelen var sfäriskt lagrad, är att läget relativt provhållaren troligtvis inte har någon avgörande betydelse för skjuvhållfasthetskaraktäristiken så länge den inte hamnar utanför det uppmätta intervallet motsvarande $|V_{Hp100}| = 0.35$ mm.

Även replikor med geometrisk överensstämmelse med bergprovet visade de sig ha en lägre skjuvhållfasthet än bergprovet. Genom analys av skanningdata före och efter skjuvprovning kunde det påvisas att nötningen i bergprovet var större. Detta kan indikera att skillnaderna i materialegenskaper mellan replikor och bergprov får genomslag på skjuvhållfasthetskaraktistiken. Vad skillnaderna i materialegenskaper mer specifikt utgörs av är inte klarlagt inom ramen för detta arbete. Klarlagt är att det går att tillverka replikor med hög reproducerbarhet, att de i övrigt beskriver bergprovets skjuvhållfasthetskaraktistisk väl genom att replikornas residualsjuvhållfasthet och skjuvstyvhet överensstämmer med bergprovets, och att skjuvhållfasthetsmaximum nåddes vid ungefär samma skjuvförskjutning. Slutsatsen är därför att replikor tillverkade och geometriskt kvalitetssäkrade enligt vad som beskrivs i denna rapport är användbara i parameterstudier. Replikor bör dock inte användas för att prediktera maximal skjuvhållfasthet förrän orsakerna till skillnaderna är identifierade.

Nyckelord: apertur, bergspricka, geometrisk kvalitetssäkring, replikor, skjuvhållfasthet, skjuvtestutrustning, styvhet testsystem

SUMMARY

Rock joints influence the stability in rock masses, which in turn affect which loads rock constructions shall be designed with respect to. The prediction of the strength of rock joints is among others done with help of failure criteria, which are developed from shear tests executed under controlled laboratory conditions. Indications on the influence of the specimen size on the shear strength exist, the so-called scale effect. Yet, the uncertainty of how to interpret the results from rock joint specimens is large. It is not possible to state to what extent it is differences in specimen size or the fact that each rock joint surface is unique that affects the results. Therefore, as an alternative, imprints of rock joints are frequently used in various studies. Also, in this case the uncertainties of how to interpret the results are large, since documentation is missing on how well the imprints represent rock joints and how large the spread between the imprints are.

Therefore, to contribute with new knowledge about the scale effect a new shear test equipment has been developed, which facilitates tests on sizes in combination with stress levels that previously have not been possible to execute (up to 400 x 600 mm with 5 MN in shear and normal loading). The functionality of the setup has been successfully evaluated. Specifically, an approach to compensate for the system normal stiffness under the CNS boundary condition has been developed. Using this approach, the deviation from the nominal normal load will be reduced, which otherwise will be too low. Despite the high system normal stiffness of 11 326 kN/mm it could be shown that just over 9% too low normal load was applied at 4.2 MN and this could be corrected for by application of the approach.

The possibility to use parametric studies in the development of shear strength criteria is potentially of large usefulness but cannot be applied to rock joints since they by nature are unique. Instead, imprints of crack surfaces, replicas, could be employed. However, a prerequisite is knowledge about how well the replicas represent rock joints. Therefore, two parameters based on scanning data to be used for geometrical quality assurance have been derived. The standard deviation of the deviations between the scanning data points of the rock and replica crack surfaces, denoted σ_{mf} , turned out to represent the morphological deviations (the shape of the joint crack surfaces). It was demonstrated that it is possible to reproduce replicas with $\sigma_{mf} \leq 0.06$ mm. The second parameter describes the deviation of the replica relatively to the rock specimen with respect to holder position. By projection of the normal to the best fit plane of the replica to the corresponding plane of the rock joint specimen a vector designated V_{Hp100} was obtained that capture the deviation with respect to magnitude and direction. The deviations were not large with respect to magnitude, but the spread was, expressed in angles [0.02°, 0.21°]. The conclusions for these tests, in which the upper part was spherically stored, is that the position relatively to the specimen holder probably does not has a significant impact on the shear strength characteristics as long as the deviations does not fall outside the measured interval corresponding to $|V_{Hp100}| = 0.35$ mm..

Replicas geometrically matching the rock joint specimen also turned out to possess a lower shear strength than the rock joint specimen. Through analysis of scanning data before and after the shear test it could be shown that the wear was larger in the rock joint specimen. This is an indication of differences in material properties between the replicas and the rock joint could have an impact on the shear strength characteristics. Which these differences specifically are has not been investigated within the scope of this work. It has been made clear that it is possible to manufacture replicas with high reproducibility and that they in other aspects capture the shear strength characteristics of the rock joint well through similarities in the shear strength peak and the shear stiffness, and the shear displacement at the shear strength peak. The conclusion is therefore that replicas manufactured and geometrically quality assured in accordance with what is presented in this report are useful in parametric studies. However, replicas should not be used to predict the peak shear strength until the causes to the deviations in peak shear strength have been identified.

Keywords: aperture, geometrical quality assurance, replicas, rock joint, shear strength, shear test equipment, test system stiffness

INNEHÅLL

1. INTRODUKTION	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och mål.....	2
2. KONSTRUKTION, TILLVERKNING OCH INPROVNING AV EN 5 MN SKJUVTESTUTRUSTNING.....	3
2.1 Konstruktion och tillverkning.....	3
2.2 Inprovning.....	6
3. DIREKTA SKJUVTESTER PÅ SKALAN 70 X 100 MM.....	19
3.1 Provpreparering och tillverkning av replikor.....	19
3.2 Skanning och kontaktrycksmätningar.....	22
3.3 Resultat från direkta skjuvtester	24
4. KVALITETSSÄKRING AV REPLIKOR.....	27
4.1 Kvalitetssäkringsparameter med avseende på morfologi	27
4.2 Kvalitetssäkringsparameter med avseende på läget relativt provhållarna	35
4.3 Parametrarnas koppling till utfallet från direkta skjuvtester.....	44
4.4 Andra faktorerers inverkan än den rent geometriska på utfallet från direkta skjuvtester.....	49
4.5 Kompletterande analys på replikor med perfekt passade sprickor	58
5. DISKUSSION	67
6. SLUTSATSER.....	71
7. FÖRSLAG PÅ FORTSATT ARBETE.....	73
8. REFERENSER.....	77

1. INTRODUKTION

Förekomsten av bergsprickor påverkar stabiliteten i bergmassor, vilket i sin tur inverkar på vilka laster berganläggningar skall dimensioneras för. En kritisk felmod att dimensionera mot är skjuvning. Bergsprickors skjuvhållfasthet påverkas av flera faktorer såsom sprickytornas råhet, passning, utfällningar och hur lasterna verkar. Dessa faktorer är därför av vikt att beakta i studier av skjuvprocesserna. Ytterligare en faktor att ta hänsyn till är skalan. Alltsedan 80-talet pågår emellertid en diskussion gällande storleken på sprickytorans inverkan på skjuvhållfastheten (exempelvis Bandis 1980; Casagrande et al. 2018; Johansson 2016; Tatone et al. 2013; Yong et al. 2019).

Det är dock så, att av både tekniska och ekonomiska skäl är det inte möjligt att utföra tester i fullskalemiljö (Bandis et al. 1981). Utvecklingen av skjuvhållfasthetskriterier sker därför under kontrollerade former i laboratoriemiljö (exempelvis Bahaaddini 2017; Johansson et al. 2014; Zhu et al. 2019). Här återfinns en annan utmaning i det att varje bergspricka är unik, vilket omöjliggör parameterstudier (Grasselli 2001). En möjlig väg för att kringgå denna utmaning är att istället använda avgjutningar av bergsprickans ytor, så kallade replikor (exempelvis Fathi et al. 2016; Gui et al. 2019; Hossaini et al. 2014; Koupouli et al. 2016). Trots en relativt frekvent användning av replikor i olika studier har det inte undersökts hur väl replikorna representerar och återskapar bergsprickors skjuvhållfasthetskaraktär. Detta skapar ett ifrågasättande av resultat från studier där replikor använts. Ifrågasättandet kan både gälla hur väl replikornas sprickytor överensstämmer med bergsprickans och vilken inverkan skillnaderna i materialegenskaper mellan replikamaterial (vanligtvis betong eller gips) och berg har på skjuvhållfasthetskaraktären.

1.1 Bakgrund

I POST-projektet initierat av SKB, Posiva och NWMO, som utfördes under perioden 2014 – 2016, var syftet att utveckla en strategi för att kunna beskriva geologiska strukturer och sprickor i kristallina bergmassor, samt skapa en förståelse för skalanpassning av parametrarna till skjuvhållfasthetskriterier baserade på data från laborietester. En av slutsatserna var att numerisk modellering krävs för att förstå fullskaliga bergmassors beteende, men att de konstitutiva modellerna måste valideras genom experiment på flera olika skalor, där den idag vanligt förekommande skalan på runt en kvadratdecimeter behöver kompletteras med test på större skala.

Baserat på slutsatserna initierades 2017 ett fortsättningsprojekt, POST2, finansierat av SKB och NWMO. Inom detta projekt togs ett antal provkroppar fram med storleken 70 x 100 mm innehållande bergsprickor och från en av dessa tillverkades replikor av höghållfast betong. Provkropparna användes sedan i direkta skjuvtester under varierande randvillkor. Sprickytorna skannades före och efter testerna. Kontaktrycksmätningar med tryckkänslig film genomfördes innan skjuvtesterna.

1.2 Syfte och mål

Som en del av utvärderingen av den data som genererats inom POST2 projektet startades ett doktorandprojekt finansierat av BeFo. De övergripande syftena med detta projekt är:

- Undersöka bergmekaniska parametrars eventuella variation med storleken på provkropparna (skaleffekten) genom att utföra storskaliga skjuvförsök.
- Utveckla och prova egentillverkade provkroppar (replika) med bergliknade egenskaper för att möjliggöra parameterstudier genom repetitiva experiment.

Innehållet i denna rapport är kopplat till den inledande första halvan av doktorandarbetet motsvarande licentiatexamen och är specifikt kopplat till:

- Konstruktion, tillverkning och inprovning av en skjuvtestutrustning med kapacitet för provstorlekar upp till 400 x 600 mm under belastningar upp till 5 MN i både normal-och skjuvriktning. Syftet är att skapa en plattform för skjuvtester under kontrollerade laboratorieförhållanden på större ytor än vad som hittills varit möjligt som ett led i att bringa ny kunskap om skaleffekten.
- Jämförelser mellan resultat från skjuvning av bergprov och replikaprover för att undersöka hur väl de representerar verkliga sprickor. Syftet är att klargöra förutsättningarna för användandet av replikor i parameterstudier vid utvecklandet av skjuvhållfasthetskriterier för bergmassor.

2. KONSTRUKTION, TILLVERKNING OCH INPROVNING AV EN 5 MN SKJUVTESTUTRUSTNING

En ny utrustning har tagits fram för genomförandet av direkta skjuvtester i provstorlekar i kombination med spänningsnivåer som hittills inte varit möjliga att genomföra under välkontrollerade laboratorieförhållanden. Syftet är att ta fram nya unika testdata för att ta fram ny kunskap om skaleffekten.

Specifikation för utrustningen är enligt följande:

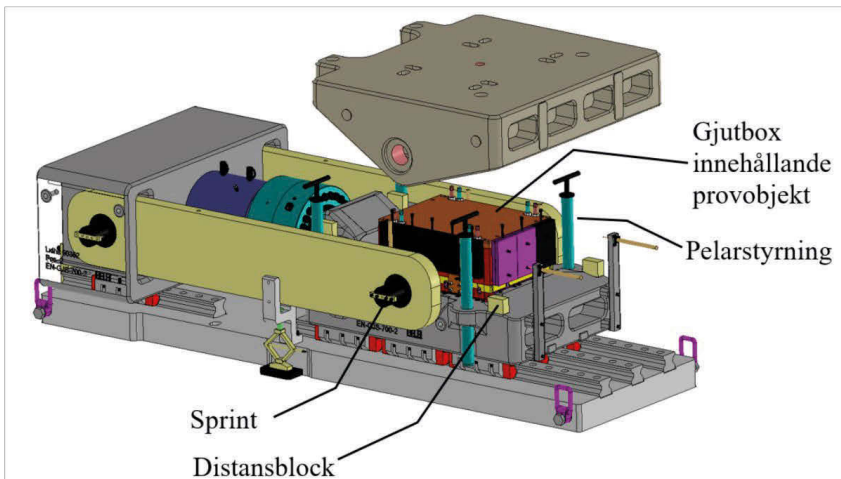
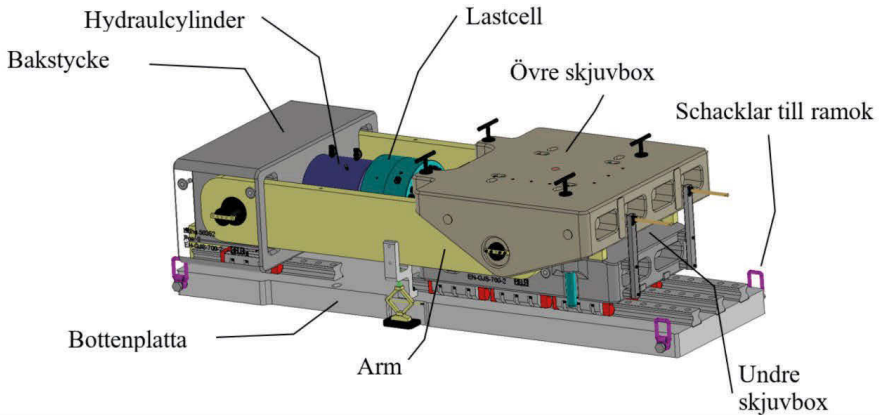
• Utrustningens dimensioner	3.6 x 1.4 x 0.9 m (L x B x H)
• Vikt	16 ton
• Maximal vertikallast	5 MN
• Maximal horisontallast plusrörelse	5 MN
• Maximal horisontallast minusrörelse	3.5 MN
• Maximal skjuvlängd	50 mm
• Maximal provstorlek (L x B x H)	600 x 400 x 350 mm
• Förskjutningshastighet skjuvning:	
▪ Under belastning	0.5 mm/min
▪ Minusrörelse obelastad	5 mm/min

2.1 Konstruktion och tillverkning

Skjuvtestutrustningens komponenter är gjorda av stål och segjärn. Grundprincipen för konstruktionen är att skjuvkraften genereras av en hydraulcylinder som via en lastcell verkar på den undre skjuvboxen, vilken rör sig horisontellt på linjärstyrningar försedda med rullager. Den övre skjuvboxen hålls fixerad i horisontalriktningen genom två armar förbundna till ett bakstycke. Provkroppen ligger ingjuten i två gjutboxar, vilka i sin tur är fixerade i den undre respektive övre skjuvboxen med själva sprickan i det öppna utrymmet mellan skjuvboxarna (Figur 1, där endast den övre gjutboxen visas då den nedre ligger monterad i den undre skjuvboxen).

Normalkraften läggs på med hjälp av en separat 20 MN belastningsutrustning till vilken skjuvtestutrustningen är förbunden via den övre skjuvboxen med ett sfäriskt lager. Eftersom kolven som genererar normalkraften inte kan förflyttas i horisontalplanet måste skjuvrörelsen åstadkommas genom förflyttning av den undre skjuvboxen. Att den övre delen hålls fixerad medan den undre rör sig motsvarar inte det verkliga skeendet under till exempel ett skred eller kilbrott, då istället det omvända gäller. För syftet med detta arbete, vilket är att studera bergssprickors skjuvhållfasthet, utgör detta ingen inskränkning då det är sprickyornas relativa rörelse som av betydelse. Vid riggning lyfts skjuvtestutrustningen på plats på belastningsutrustningens rullbord och fixeras med dubbar. Rullbordet skjuts därefter på plats och fixeras i sin tur i golvet med dubbar. Figur 2 visar skjuvtestutrustningen monterad i belastningsutrustningen.

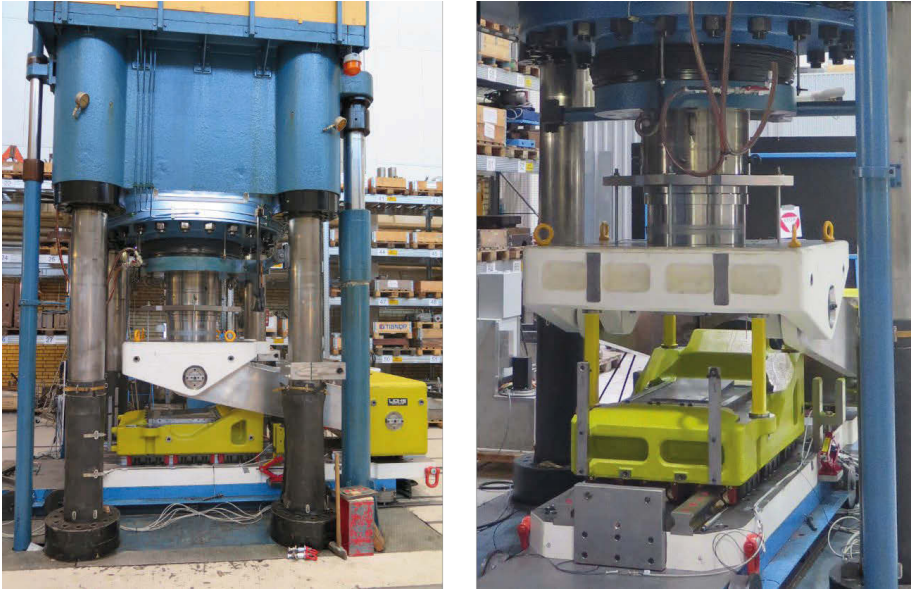
För att erhålla mätdata av hög kvalitet är det av vikt att det inte finns något glapp mellan komponenterna som överför krafterna. Toleransen mellan sprintarna och armarna är därför satta med höga krav. Gjutboxarna är försedda med ett positioneringssystem som fixerar deras inbördes läge, så att dessa i sin tur med hjälp av styrplattor kan fixeras glappfritt i skjuvboxarna.



Figur 1. Översikt av konstruktionen för den nya skjuvtestutrustningen.
Figure 1. Overview of the design of the new shear test equipment.

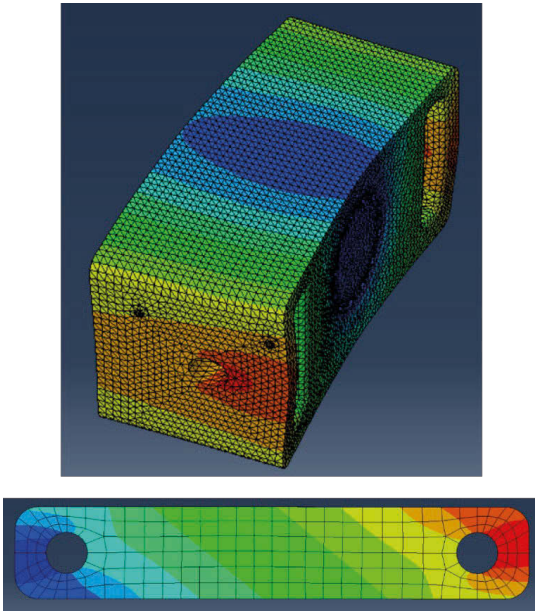
Styrningen sker via ett MTS 100 styrsystem till vilket 5 MN skjuvtestutrustningens positions- och kraftsignaler samlas in tillsammans med motsvarande signaler från 20 MN belastningsutrustningen. Skjuvtestutrustningens cylinder drivs av ett separat hydraulaggregat som opererar under 700 bars tryck. Styrningen av normallasten sker utifrån fyra lägesgivare monterade i den övre skjuvboxen. Styrningen av skjuvförskjutningshastigheten baseras på signalen från en lägesgivare monterad direkt

på hydraulcylinderns kolv. Själva skjuvförskjutningen registreras av två lägesgivare som mäter den relativa positionen mellan den undre och den övre skjuvboxen.



Figur 2. 5 MN skjuvtestutrustning monterad i 20 MN belastningsutrustning.
Figure 2. 5 MN shear test equipment mounted in 20 MN loading equipment.

Under konstruktionsfasen genomfördes ett antal finita elementberäkningar med syftet att säkerställa att inga områden blir lokalt överbelastade vid maximal last, samt för att hålla de elastiska deformationerna så små som möjligt. Detta görs för att reducera de skjuvförskjutningar som uppstår på grund av frigjord elastisk energi vid plötsligt minskat behov av skjuvkraft, vilket sker under skjuvning när motståndet för att bringa sprickytorna i rörelse relativt varandra varierar (Figur 3).

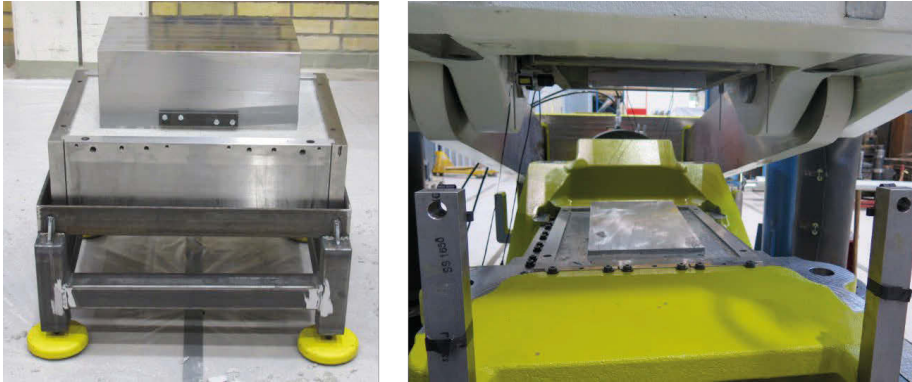


Figur 3. Exempel på finita element-analyser av förskjutningar vid 5 MN. Bakstycke ovan (förstoring 200 x, rött 1.32 mm, blått 1.75 mm). Arm nedan (förstoring 1 x, rött 0.25 mm, blått 1.53 mm).

Figure 3. Example on finite element analysis of displacements at 5 MN. Rear attachment block upper figure (magnification 200 x, red 1.32 mm, blue 1.75 mm). Arm lower figure (magnification 1 x, red 0.25 mm, blue 1.53 mm).

2.2 Inprovning

Styrsystemets och de ingående programmens funktion har verifierats genom att en provkropp av stål bestående av två halvor delade i ett plan med känd lutningsvinkel genomgått olika test där den kända förväntade responsen jämförts med uppmätta värden (Figur 4).



Figur 4. Provkropp av stål för verifierande tester ingjuten i undre gjutbox (vänster) och monterad i skjuvtestutrustning (höger).

Figure 4. Test dummy made of steel used in verifying tests with encapsulating grout in the lower casting box (left) and mounted in the shear test equipment (right).

2.2.1 Ett tillvägagångssätt för att kompensera för inverkan av testsystemets normalstyvhet i direkta skjuvtester med randvillkoret konstant normalstyvhet

Två vanliga konfigurationer för direkta skjuvtester är konstant normallast (CNL) och konstant normalstyvhet (CNS). CNL representerar förhållandena i slänter medan CNS representerar den omgivande bergmassans styvhet kring djupt liggande sprickor (Thirukumaran et al. 2016). Detta innebär att för ett skjuvtest under CNL är normalbelastningen helat tiden konstant och simulerar det ovanpå sprickan liggande materialets massa. För CNS ökar normallasten proportionerligt mot dilatansen, där storleken på ökningen styrs av en användardefinierad normalstyvhet, som representerar den omgivande bergmassans motstånd mot dilatation. Normallastökningen styrs mot en virtuell styvhet som appliceras genom provuppställningens styrsystem genom kontinuerlig återkoppling av uppmätt dilatans (Jiang et al. 2004). Den pålagda styvheten används för att beräkna proportionaliteten mellan sprickans dilatans och normalspänningen.

Eftersom utrymmet i provuppställningen kring sprickan många gånger är begränsad är det svårt att mäta dilatansen direkt. Därför finns det ofta inget annat val än att placera lägesgivarna en bit bort från själva sprickan. Detta medför en risk att andra förskjutningar än de som är direkt relaterade till sprickan mäts upp. Av denna anledning måste därför testsystemet göras så styvt som möjligt vilket även påpekas i ISRM “Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints” 2014. Med testsystem avses här alla ingående komponenter som bidrar till normalförskjutningar lokaliserade mellan lägesgivarnas mätpunkter. Kalibrering av testsystemet kan göras genom att istället för provobjektet (berg eller replika) först gjuta

in en provkropp av stål som sedan utsätts för ett normalbelastningstest. Genom stålets höga styvhet i förhållande till testsystemets övriga styvheter är tanken med ett sådant test är att fånga upp testsystemets alla normalförskjutningar, förutom de som är relaterade till provobjektets spricka och bulkmaterial. De uppmätta normalförskjutningarna och lasterna används därefter för att kompensera för testsystemets normalstyvhet.

I litteraturen finns emellertid begränsad information hur och om någon kompensation för testsystemets normalstyvhet gjorts (Barla et al. 2010; Haberfield et al. 2003; Moradian et al. 2013; Rao et al. 2009; Hans et al. 2003). När det gäller CNL finns det en metod för att kompensera för testsystemets normalstyvhet genom att till uppmätta normalförskjutningar under skjuvning med provobjektet addera förskjutningar på motsvarande lastnivå uppmätta med stålprovet under normalbelastningstest. Ett sådant tillvägagångssätt har bland annat använts av Chryssanthakis et al. 2004 och Dae-Young et al. 2006.

Det finns dock inget tillvägagångssätt beskrivet i litteraturen för kompensation i samband med CNS-test. Normallastökningen i CNS-test skall vara proportionell mot dilatansen, med detta är inte fallet eftersom testsystem inte är oändligt styva. Utöver sprickans och bulkmaterialalets i provkroppens styvhet finns det andra oönskade, men oundvikliga styvhetskomponenter som här benämns systemnormalstyvheten, k_{sys} . Denna styvhet ger under normalbelastning upphov till deformationer som till exempel kan ha sitt ursprung i ojämna kontaktytor mellan betongingjutning och provhållare eller genom deformationer i själva betongingjutningen. Existensen av k_{sys} får till konsekvens att mindre normalförskjutningar registreras av lägesgivarna än vad fallet skulle varit under inverkan av enbart dilatansen från sprickan, vilket i sin tur innebär att för låga normallaster läggs på. Ett tillvägagångssätt för att kompensera för detta har utvecklats och publicerats inom projektet och sammanfattas i det följande (Larsson et al. 2020).

Om den avsiktliga normalstyvheten, det vill säga den styvhet som matas in i provuppställningens styrsystem och som simulerar den omgivande bergmassans styvhet under dilatation, betecknas k_{ns} kan relationen mellan k_{ns} , den pålagda normallasten N och den totala normalförskjutningen δ_n i en provuppställning som schematiskt beskrivs med en linjär fjädermodell enligt Figur 5a tecknas som

$$k_{\text{ns}} = \frac{N}{\delta_n}. \quad (1)$$

Eftersom provuppställningen inte är oändligt styv behövs dock även den tidigare nämnda systemnormalstyvheten, k_{sys} , inkluderas i fjädermodellen. För att erhålla samma N som under inverkan av enbart k_{ns} och δ_n behövs därför den effektiva normalstyvheten k_{eff} introduceras, vilken skall kopplas i serie med k_{sys} för att ge samma N och δ_n enligt Figur 5b. Styvheterna i Figur 5a och Figur 5b skall vara lika, vilket uttryckt i förskjutningar innebär att

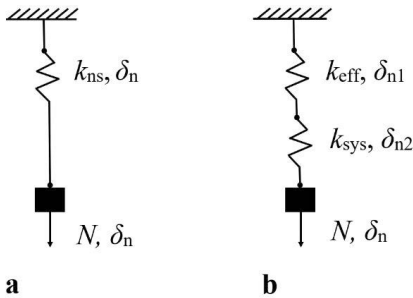
$$\delta_n = \delta_{n1} + \delta_{n2}. \quad (2)$$

Denna relation kan även tecknas

$$\frac{N}{k_{ns}} = \frac{N}{k_{eff}} + \frac{N}{k_{sys}} \quad (3)$$

Löses k_{eff} ut erhålles

$$k_{eff} = \frac{k_{ns}}{1 - \frac{k_{ns}}{k_{sys}}} \quad (4)$$



Figur 5.

a. Illustration av en fjäder med styvheten k_{ns} med en pålagd last N , vilket resulterar i en normalförskjutning δ_n .

b. Under inverkan av styvheten k_{sys} krävs tillskott av styvheten k_{eff} för att uppnå samma totala styvhet k_{ns} som under **a**.

Figure 5.

a. Illustration of a spring with stiffness k_{ns} , subjected to a load N , yielding a normal displacement δ_n .

b. Under the influence of the stiffness k_{sys} , an addition of the stiffness k_{eff} is required to achieve the same total stiffness of k_{ns} as in a.

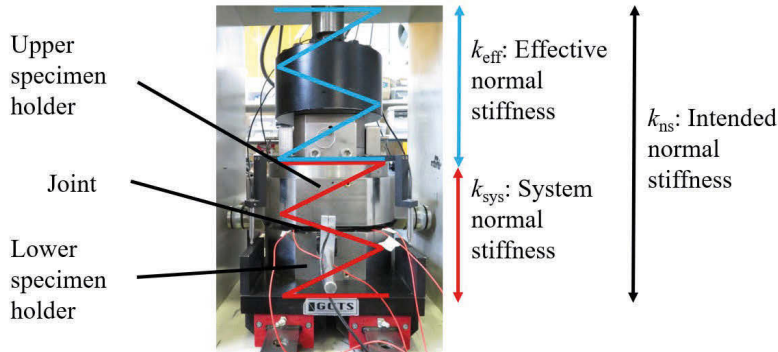
Larsson et al. 2020, <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Den fysikaliska tolkningen av k_{ns} , k_{sys} och k_{eff} framgår av Figur 6. k_{sys} är alltså den systemnormalstyvhet som finns mellan lägesgivarnas mätpunkter, förutom bidraget från sprickan och provkroppens styvhet. Det går inte att särskilja bidragen till den totala systemnormalstyvheten från under- respektive överdelen. Det är inte heller av intresse av att kunna göra detta eftersom det är den totala systemnormalstyvheten mellan lägesgivarnas mätpunkter som skall kompenseras för. Sammanfattningsvis gäller alltså att under inverkan av k_{sys} måste en styvhet k_{eff} större än k_{ns} ges som indata i styrsystemet för att effekten skall bli att k_{ns} skall verka över sprickan.

Tillvägagångssättets funktionalitet validerades i en 300 kN skjvtestutrustning i vilken ett stålprov med måtten 100 x 100 mm (längd x bredd) monterats. Stålprovet delades i två halvor av ett delningsplan med vinkeln $\alpha = 1.8^\circ$ relativt horisontalplanet (Figur 7). I ett första skede normalbelastades stålprovet genom att först lägga på en förspänning på runt 0.1 MPa som sedan följdes av fyra lastcykler mellan 0.5 och 12 MPa vid en belastningshastighet på 10 MPa/min. Ur grafen normalspänning mot normaldeformation

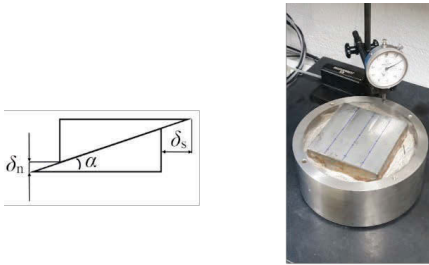
utlästes därefter k_{sys} till 47.1 MPa/mm från sekantmodulen i spänningsintervallet 5 – 10 MPa (Figur 8). Detta spänningsintervall bedömdes vara representativt för verkliga applikationer, men vilket annat intervall kunde ha valts för att validera tillvägagångssättet. Vidare framgår det att grafen är olinjär, vilket innebär att det är en approximation att representera den med en linjär sekantmodul. Att sekantmodulen trots detta använts i valideringen av tillvägagångssättet beror på att tillämpningen av sekantmodulen är enkel att praktisera. I det fall sekantmodulen skulle visa sig ge tillräcklig noggrannhet vore det onödigt att ha validerat tillvägagångssättet med en mer omständligt tillämpad olinjär systemnormalstyvhet.

I ett andra skede användes samma stålprov i genomförandet av direkta skjuvtester under villkoret CNS med en initial normalspänning, $\sigma_{n0} = 5$ MPa, pålagd med 5.0 MPa/min. Skjuvningen skedde med en förskjutningshastighet på 0.5 mm/min tills en skjuvförskjutning, δ_s , på ungefär 8 mm uppnåts. Areakorrekction användes för att erhålla korrekta spänningar under det att kontaktytan gradvis minskade under skjuvprocessen. Två skjuvtester utfördes. Den användardefinierade avsiktliga normalstyvheten k_{ns} valdes till 15 MPa/mm och detta värde sattes som ingångsvärde i styrsystemet i det första skjuvtestet. Inför det andra testet beräknades $k_{\text{eff}} = 22.0$ MPa/mm baserat på Ekv. (4) med $k_{\text{ns}} = 15$ MPa/mm och $k_{\text{sys}} = 47.1$ MPa/mm.



Figur 6. Den fysikaliska tolkningen av Ekv. (4), vilken påvisar att genom existensen av systemnormalstyvheten k_{sys} skall istället en effektiv normalstyvhet k_{eff} anges som indata till styrsystemet för att uppnå den avsiktliga normalstyvheten k_{ns} över provobjektet. *Figure 6. Physical interpretation of Eq. (4), that states that in the existence of the system normal stiffness, k_{sys} , instead an effective normal stiffness, k_{eff} shall be set as input in the control system to achieve the intended normal stiffness, k_{ns} , over the specimen.*

Larsson et al. 2020, <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



a

b

Figur 7.

a. Schematisk illustration av tvärsnitt till provkroppen med delningsplansvinkeln α , vid skjuvförskjutningen δ_s , som motsvaras av en normalförskjutning δ_n .

b. En av stålprovets halvor som användes vid de validerande testerna, fixerad med omslutande betong mot den ringformade provhållaren.

Figure 7.

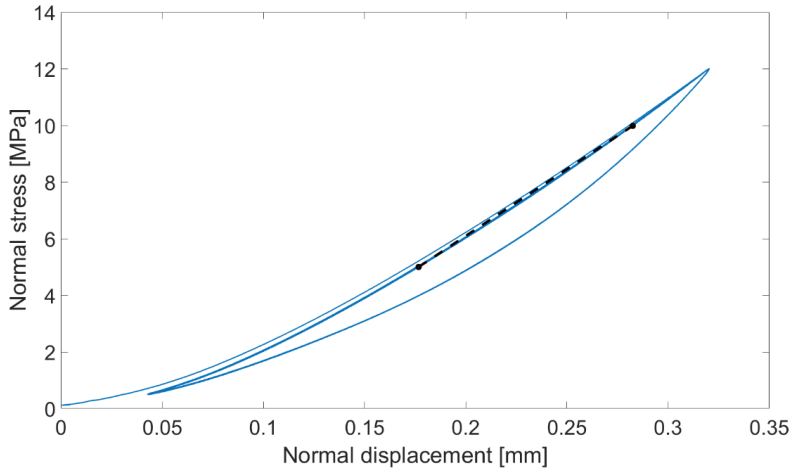
a. Schematic illustration of the cross section of the specimen with an angle of inclination α , at a shear displacement δ_s , corresponding to a normal displacement δ_n .

b. One of the halves of the steel specimen used in the validation tests, fixed with encapsulating grout to the ring-shaped specimen holder.

Larsson et al. 2020, <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Genom att plotta uppmätta värden på normalspänningen, σ_n , mot skjuvförskjutningen, δ_s , kan skillnaderna i normalspänning mellan att använda $k_{ns} = 15$ MPa/mm respektive $k_{eff} = 22.0$ MPa/mm som ingångsvärde i styrsystemet utvärderas. Med kännedom om α kan även den nominella responsen beräknas. Den nominella responsen är den verkligt sanna normalspänningen som skulle erhållits under ideala förhållanden. Just i fallet med en provkropp med en känd delningsplansvinkel kan den nominella responsen beräknas. Med hänvisning till Figur 7 beräknas först normalförskjutningen δ_n genom att multiplicera skjuvförskjutningen δ_s med tangens för delningsplansvinkeln α . Om därefter normalförskjutningen δ_n multipliceras med den avsiktliga normalstyvheten k_{ns} erhålls ökningen i normalspänning baserat på utgångsläget vid start av testet. För att få den totala normalspänningen behöver man slutligen addera den initiala normalspänningen σ_{n0} . Det matematiska uttrycket lyder

$$\sigma_{n_nom} = k_{ns}\delta_s \tan \alpha + \sigma_{n0}. \quad (5)$$

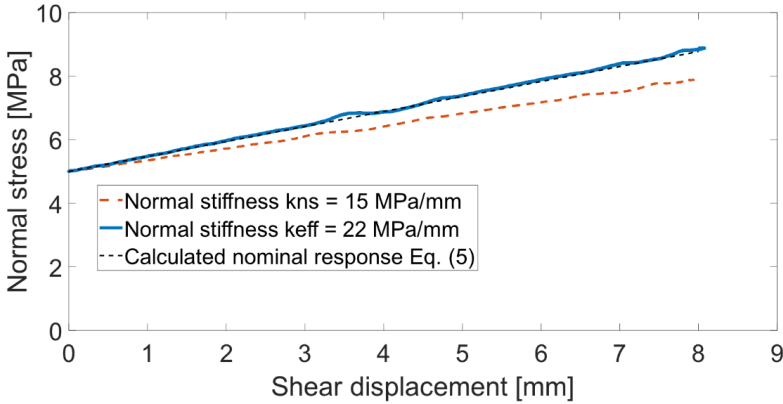


Figur 8. Normalbelastningstest med stålprov 100 x 100 mm där systemnormalstyvheten, k_{sys} , fastställts till 47.1 MPa/mm genom sekantmodulen i intervallet 5 – 10 MPa.

Figure 8. Normal loading test with steel specimen 100 x 100 mm from which the system normal stiffness, k_{sys} , was derived as 47.1 MPa/mm through the secant modulus in the interval 5 – 10 MPa.

Resultaten presenteras i Figur 9. Det framgår att skillnaden i normalspänning i slutet av skjuvtestet uppgår till cirka 13 % och att $k_{\text{ns}} = 15$ MPa/mm ger en respons med lägre last än den beräknade nominella. Detta indikerar existensen av k_{sys} och, eftersom responsen för $k_{\text{eff}} = 22.0$ MPa/mm sammanfaller väl med den nominellt beräknade, visas att tillvägagångssättet med den effektiva normalstyvheten framgångsrikt kan kompensera för inverkan av systemnormalstyvheten. För detta specifika fall skulle alltså en 13 % för låg normalspänning varit applicerad i slutet av testet om inte kompensation med den effektiva normalstyvheten gjorts. Fluktuationerna i kurvorna härrör från små ojämnheter i stålprovets kontaktyta.

Existensen av k_{sys} och behovet av att kompensera för denna genom att applicera k_{eff} har just demonstrerats med avseende på σ_n . Med intentionen att ytterligare validera tillvägagångssättet med den effektiva normalstyvheten undersöktes även effekten på δ_n . I Figur 10 faller den heldragna linjen som representerar δ_n mot δ_s från direkta skjuvtester med $k_{\text{eff}} = 22.0$ MPa/mm under linjen som visar den nominella lutningsvinkeln lika med 1.8° .



Figur 9. σ_n mot δ_s från direkta skjuvtester med $k_{ns} = 15.0$ respektive $k_{eff} = 22.0$ MPa/mm som ingångsvärden för normalstyvheten i styrsystemet. Den beräknade nominella responsen med $\alpha = 1.8^\circ$ och $k_{ns} = 15.0$ MPa/mm enligt Ekv. (5) visas också.

Figure 9. σ_n over δ_s from direct shear tests with $k_{ns} = 15.0$ and $k_{eff} = 22.0$ MPa/mm respectively as input values for the normal stiffness in the control system. The calculated nominal response with $\alpha = 1.8^\circ$ and $k_{ns} = 15.0$ MPa/mm according to Eq. (5) is also shown.

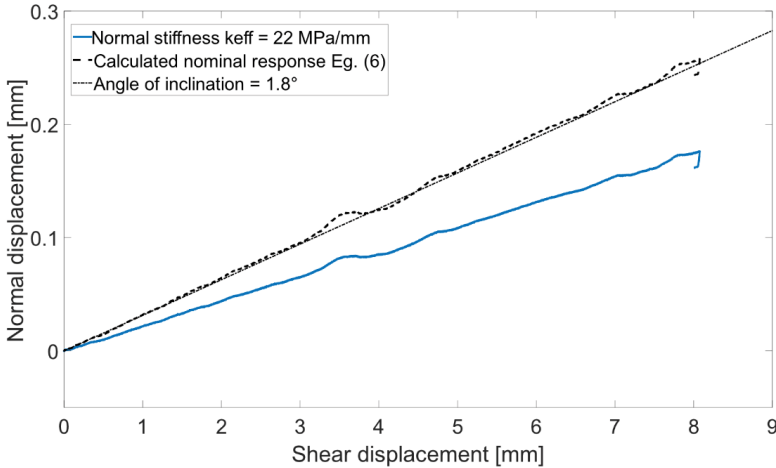
Larsson et al. 2020, <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Det har tidigare nämnts att ett testsystem under CNS-villkor kan betraktas bestå av två styvhetskomponenter: k_{eff} och k_{sys} . Det har just visats att genom att applicera $k_{eff} = 22.0$ MPa/mm kunde en god överensstämmelse mellan den applicerade och den beräknade normalspänningen erhållas under villkoren $k_{sys} = 41.7$ MPa/mm och $k_{ns} = 15.0$ MPa/mm (Figur 9). Följaktligen innebär detta att om $k_{eff} = 22.0$ MPa/mm ger korrekt normalspänning, men samtidigt lägre normalförskjutningar än de kända nominella förskjutningarna, så borde skillnaderna mellan dessa båda förskjutningar härröra från inverkan av k_{sys} och vara lika med $(\sigma_n - \sigma_{n0})/k_{sys}$. Denna relation har sitt ursprung från fjäderanalogin, från vilken förskjutningen är lika med normalspänningen dividerat med styvheten. Om denna relation vore sann skulle det innebära att den totala nominella förskjutningen från den kända nominella dilatansen skulle beräknas som

$$\delta_{n_nom} = \delta_n + \frac{\sigma_n - \sigma_{n0}}{k_{sys}}. \quad (6)$$

Den beräknade nominella responsen genom att tillämpa Ekv. (6) mot den uppmätta utgörs av den streckade grafen i Figur 10. Den beräknade nominella responsen korrelerar med den nominella lutningsvinkeln, vilket är den respons som skulle ha erhållits ifall k_{sys} inte existerade. Genom detta har det påvisats att skillnaden mellan den uppmätta responsen baserat på $k_{eff} = 22.0$ MPa/mm och den nominella lutningsvinkeln motsvarar den andra termen i högerledet i Ekv. (6). Detta innebär att skillnaden härrör

från existensen av k_{sys} , vilket ytterligare stärker valideringen av tillvägagångssättet med den effektiva normalstyvheten.



Figur 10. Normalförskjutningen, δ_n , mot skjuvförskjutningen, δ_s , vilket indikerar en diskrepans mellan den nominella lutningsvinkeln och den uppmätta responsen med $k_{\text{eff}} = 22.0$ MPa/mm som ingångsvärde för normalstyvheten i styrsystemet. Genom beräkningar med Ekv. (6) kan det påvisas att skillnaderna härrör från k_{sys} .

Figure 10. The normal displacement, δ_n , over the shear displacement, δ_s , indicating a discrepancy between the nominal angle of inclination and the measured response using $k_{\text{eff}} = 22.0$ MPa/mm as input value for the normal stiffness in the control system.

Through calculation using Eq. (6) it is shown that the difference originates from k_{sys} .

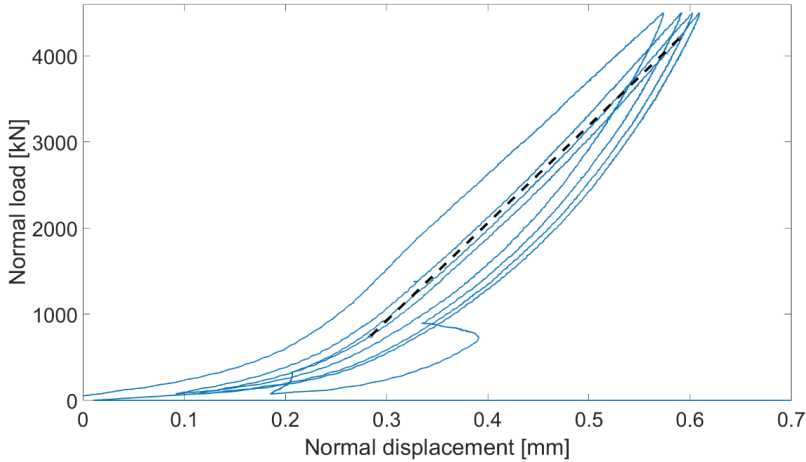
Larsson et al. 2020, <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

2.2.2 Utvärdering och kompensering av 5 MN - provuppställningens systemnormalstyvhet

Efter att i föregående avsnitt demonstrerat tillämpbarheten av tillvägagångssättet med den effektiva normalstyvheten undersöks här den nya provuppställningens, med 5 MN i lastkapacitet, systemnormalstyvhet och behovet av att kompensera för denna i samband med skjuvtester med randvillkoret CNS. Spänningen användes i valideringen i föregående avsnitt. Detta ändrar inget i sak, men det som avgör behovet av att kompensera för systemnormalstyvheten är lasten testsystemet är utsatt för snarare än spänningen. Detta eftersom en provkropp kan ha en liten sprickyta med en hög normalspänning även om en för testsystemet låg normalkraft läggs på. Omvänt kan en provkropp med stor sprickyta med låg normalspänning innebära att för testsystemet hög normalkraft måste läggas på. Därför används normallasten i det följande.

Ett stålprov 300 x 500 mm med delningsplansvinkeln 4° (Figur 4) normalbelastades genom att först lägga på en förlast på runt 45 kN som sedan följdes av fyra lastcykler

mellan 75 och 4 500 kN vid en belastningshastighet på 750 kN/min. Systemnormalstyvheten utvärderades som sekantmodulen i intervallet 750 – 4 200 kN och k_{sys} fastställdes till 11 326 kN/mm (Figur 11).



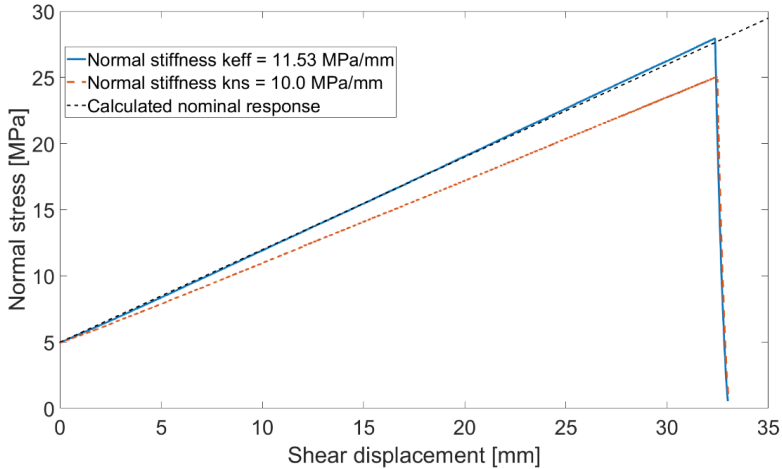
Figur 11. Normalbelastningstest med stålprov 300 x 500 mm där systemnormalstyvheten, k_{sys} , fastställts till 11 326 kN/mm genom sekantmodulen i intervallet 750 – 4 200 kN.

Figure 11. Normal loading test with steel specimen 300 x 500 mm from which the system normal stiffness, k_{sys} , was derived as 11 326 kN/mm through the secant modulus in the interval 750 – 4 200 kN.

Efter den första lastcykeln var testsystemet konsoliderat och systemnormalstyvheterna i pålastningscykel 2 – 4 låg i intervallet 11 326 – 11 418 kN/mm. För att få en bild av proportionerna kan ovanstående lastnivåer och systemnormalstyvheter jämföras med motsvarande värden i Avsnitt 2.2.1. Omräknade till laster innebär detta en systemnormalstyvhet 471 kN/mm i intervallet 50 – 100 kN. Provpuppställningen med den nya 5 MN – skjuvtestutrustningen har således en mycket hög systemnormalstyvhet, vilket är en bra förutsättning för att erhålla bra mätdata. Avvikelsen som ses i slutet av den andra avlastningscykeln beror på att hydraulcylindern som styr skjuvrörelsen backade knappt 1.5 mm innan den återtog sin rätta position i början av den tredje pålastningscykeln.

För att utvärdera 5 MN-provpuppställningens noggrannhet för normalspänningen under CNS och för att undersöka de eventuella behoven av att kompensera för denna med det föreslagna tillvägagångssättet utfördes samma typ av test som tidigare redogjorts för. Med en initialspänning på 5 MPa (750 kN) belastades provpuppställningen upp till nominellt 28 MPa (4 200 kN) under CNS med $k_{\text{ns}} = 10.0$ MPa/mm (1 500 kN/mm) med en skjuvförskjutningshastighet på 0.5 mm/min. Som framgår av Figur 12 medför detta

att en för låg normalspänning läggs på i enlighet med förklaringsmodellen som redogjorts för i avsnitt 2.2.1. Därför gjordes ytterligare ett test med istället $k_{\text{eff}} = 11.53$ MPa/mm (1 729 kN/mm) beräknad från Ekv. (4) som ingångsvärde i styrsystemet. Som framgår av Figur 12 medför detta att inverkan av systemnormalstyvheten kompenseras för. Felet i pålagd normalspänning reduceras därmed betydligt, vilket framgår genom att grafen för k_{eff} följer den beräknade nominella responsen väl.



Figur 12. σ_n mot δ_s från direkta skjuvtester med $k_{\text{ns}} = 10.0$ MPa/mm (1 500 kN/mm) respektive $k_{\text{eff}} = 11.53$ MPa/mm (1 729 kN/mm) som ingångsvärden för normalstyvheten i styrsystemet. Den beräknade nominella responsen med $\alpha = 4^\circ$ och $k_{\text{ns}} = 10.0$ MPa/mm enligt Ekv. (5) visas streckad.

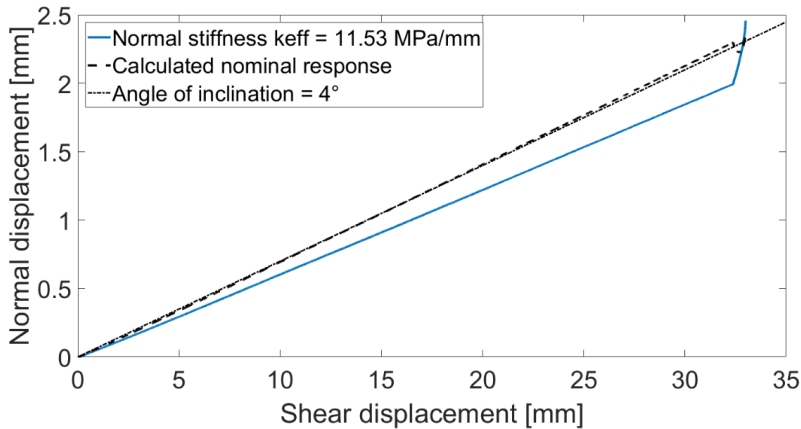
Figure 12. σ_n over δ_s from direct shear tests with $k_{\text{ns}} = 10.0$ MPa/mm (1 500 kN/mm) and $k_{\text{eff}} = 11.53$ MPa/mm (1 729 kN/mm) respectively as input values for the normal stiffness in the control system. The calculated nominal response with $\alpha = 4^\circ$ and $k_{\text{ns}} = 10.0$ MPa/mm according to Eq. (5) is shown dashed.

Larsson et al. 2021, [Creative Commons Attribution 4.0 International licence](#).

Vid den nominella spänningen 27.6 MPa ger $k_{\text{eff}} = 28.0$ MPa (1.4 % fel) och $k_{\text{ns}} = 25$ MPa (9.4 % fel). Som framgår från Figur 11 är systemnormalstyvheten olinjär och att detta innebär att ett fel introduceras när approximationen med sekanten introduceras. Specifikt framgår att sekantstyvheten överskattar systemnormalstyvheten i det lägre spänningsintervallet och tvärtom i det övre. Detta innebär att för lägre spänningar görs en för liten compensation medan det omvända gäller för högre. Detta framgår även i Figur 12 genom att grafen för k_{eff} initialt hamnar under den nominella beräknade responsen för att i slutet av testet istället hamna något över. Om det skulle visa sig finnas behov av att reducera felet än mer finns möjligheten att i det presenterade tillvägagångssättet istället för ett konstant sekantmodulsvärde på k_{sys} beskriva k_{sys} med ett polynom som beskriver olinjäriteten i normalbelastningskurvan. Felet i normallast

som uppkommer då sekantmodulen används istället för den olinjära systemnormalstyvheten, kan kvantifieras genom integration av differensen mellan sekantmodulen och uttrycket för den olinjära systemnormalstyvheten. Integrationen görs med avseende på normaldeformationerna inom önskat lastintervall (Larsson et al. 2020).

Slutligen kan motsvarande analys till den som presenteras i Figur 10 även göras för 5 MN-provuppställningen. Resultatet visas i Figur 13 där det även i detta fall framgår att skillnaden i normalförskjutning mellan responsen baserat på k_{eff} och den nominella härrör från existensen av k_{sys} .



Figur 13. Normalförskjutningen, δ_n , mot skjuvförskjutningen, δ_s , vilket indikerar en diskrepans mellan den nominella lutningsvinkeln och den uppmätta responsen med $k_{\text{eff}} = 11.53 \text{ MPa/mm}$ ($1\,729 \text{ kN/mm}$) som ingångsvärde för normalstyvheten i styrsystemet. Genom beräkningar med Ekv. (6) kan det påvisas att skillnaderna härrör från k_{sys} .
Figure 13. The normal displacement, δ_n , over the shear displacement, δ_s , indicating a discrepancy between the nominal angle of inclination and the measured response using $k_{\text{eff}} = 11.53 \text{ MPa/mm}$ ($1\,729 \text{ kN/mm}$) as input value for the normal stiffness in the control system. Through calculation using Eq. (6) it is shown that the difference originates from k_{sys} .

3. DIREKTA SKJUVTESTER PÅ SKALAN 70 X 100 MM

Den andra delen av licentiatarbetet är kopplat att utveckla och prova egentillverkade provkroppar (replika) med bergliknade egenskaper för att därefter undersöka möjligheterna att använda replikor i parameterstudier genom repetitiva experiment.

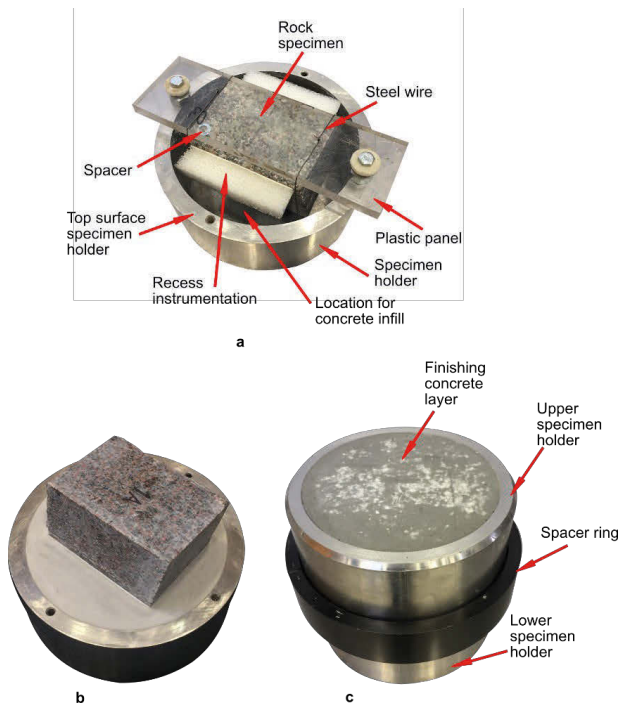
3.1 Provpreparering och tillverkning av replikor

Inledningsvis beskrivs här processerna kring provpreparering och tillverkning av replikor. Ett bergprov 70 x 100 mm av granit med en naturlig spricka kapades ut från ett moderblock med ungefärliga dimensioner 1.5 x 1.5 x 1.5 m. Blocket kommer från stembrottet i Flivik och är en medelkornig variant med hög hållfasthet både i drag (10.7 MPa enligt ASTM D2936-08, 2008) och kompression (267.9 MPa enligt ASTM D7012-04 (Metod D), 2004) med elasticitetsmodulen 72.9 GPa. Bergprovet, betecknat N1-CNL, fixerades genom betongingjutning till provhållarna (Figur 14).

Från detta prov tillverkades därefter två typer av replikor: naturlig passning betecknade RNM (Replica Natural Match) och perfekt passning betecknade RPM (Replica Perfect Match). RNM innebär att avgjutningar av bergprovets båda sprickytor gjordes. RPM innebär att endast sprickytan av bergprovets underdel gjöts av. Replikatets överdel tillverkades därefter som en direkt avgjutning av replikatets underdel. Anledningen till att dessa båda typer av replikor tillverkades är att RNM visserligen bäst representerar en bergsspricka, men att RPM ur ett utvecklingsperspektiv av skjvuhållfasthetskriterier kan vara att föredra. Detta eftersom RPM är enklare att utvärdera i det att den inte har någon aperturfördelning att beakta. Replikorna tillverkades av den höghållfasta betongen (Ducorit®D4) med draghållfasthet 8.9 MPa, kompressionshållfasthet 197.6 MPa och elasticitetsmodul 63.8 GPa. Hållfasthetstesterna utfördes efter 7 dagars härdning vid 20°C, 50% relativ fuktighet och ytterligare 21 dagars lagring i inomhusmiljö.

Vid framställningen av RNM tillverkades först gjutformar av silikon (ELASTOSIL® M4601 A/B från Wacker Chemie AG) genom att placera täcklock ovanpå provhållarna med de ingjutna bergsprickorna, och därefter fylla hålrummet med silikon (Figur 15). Provhållarringar monterades därefter på täcklocken innehållande gjutformarna, som därefter fylldes med höghållfast betong (Figur 16). Figur 17 visar färdiga replikor i provhållare.

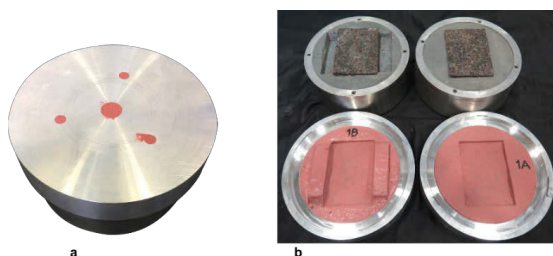
Underdelarna till RPM tillverkades på samma sätt som beskrivs i stycket ovan. Överdelarna tillverkades som direktavgjutningar av underdelarna genom att placera en övre provhållarring ovanpå den undre separerad med distansring. Före fyllning med betong avskärmades den undre sprickytan från omgivande ytor med modeller, varefter detta område fylldes med silikon. Detta gjordes för att förhindra betong att komma in i den volym mellan provhalvorna som skall vara tom (Figur 18).



Figur 14. a: Positionering av underdelen till bergprovet, N1-CNL-1, mot den undre provhållaren före ingjutning. **b:** Underdelen till bergprovet ingjuten i provhållaren med överdelen positionerad på underdelen. **c:** Överdelen ingjuten i den övre provhållaren som separeras från den undre med distansringen.

Figure 14. a: Fixation of the lower part of the rock specimen, N1-CNL-1, to the lower specimen holder before fixation with encapsulating grout. b: The lower part of the rock joint fixed to the lower specimen holder with the upper part positioned on the lower part. c: The upper part fixed with encapsulating grout to the upper specimen holder, which is kept separated from the lower by the spacer ring.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 15.

a. Täcklock monterat på provhållare innehållande bergspricka för tillverkning av gjutform av silikon.

b. Gjutformar av silikon (underdel till väster och överdel till höger) tillsammans med motsvarande bergprov i bakgrunden.

Figure 15.

a. Lid cover mounted on specimen holder containing a rock joint for manufacturing of a silicone mould.

b. Silicone moulds (lower part to the left and upper to the right) along with the corresponding rock joints in the background.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 16.

a. Täcklock innehållande gjutformarna med monterade provhållarringar.

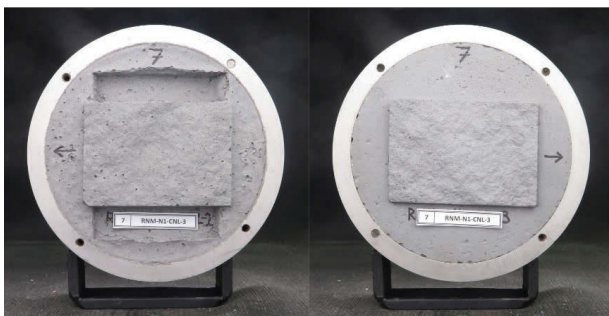
b. Tillverkning av replikor genom fyllning av provhållarringarna med höghållfast betong.

Figure 16.

a. Lid covers containing the moulds with specimen holder rings.

b. Manufacturing of replicas by filling the specimen holder rings with high strength concrete.

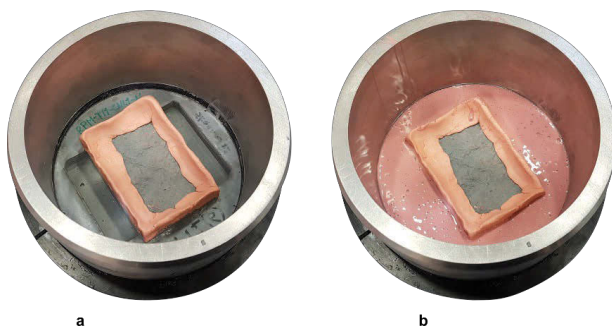
Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 17. Replikor klara att användas i direkta skjuvtester.

Figure 17. Replicas ready to be used in direct shear tests.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 18.

a. Vägg av modellera runt det undre replikatets sprickyta för att skydda den vid påföringen av silikonfyllnaden.

b. Replikaunderdel med silikonfyllnad.

Figure 18.

a Wall of clay around the circumference of the lower replica joint surface to protect it in the application of the silicone infill.

b Lower rock joint replica with silicone infill.

3.2 Skanning och kontakttrycksmätningar

Tillsammans med skjuvtester användes två ytterligare metoder för att utvärdera tillämpbarheten av replikor för parameterstudier, nämligen skanning och kontakttrycksmätningar.

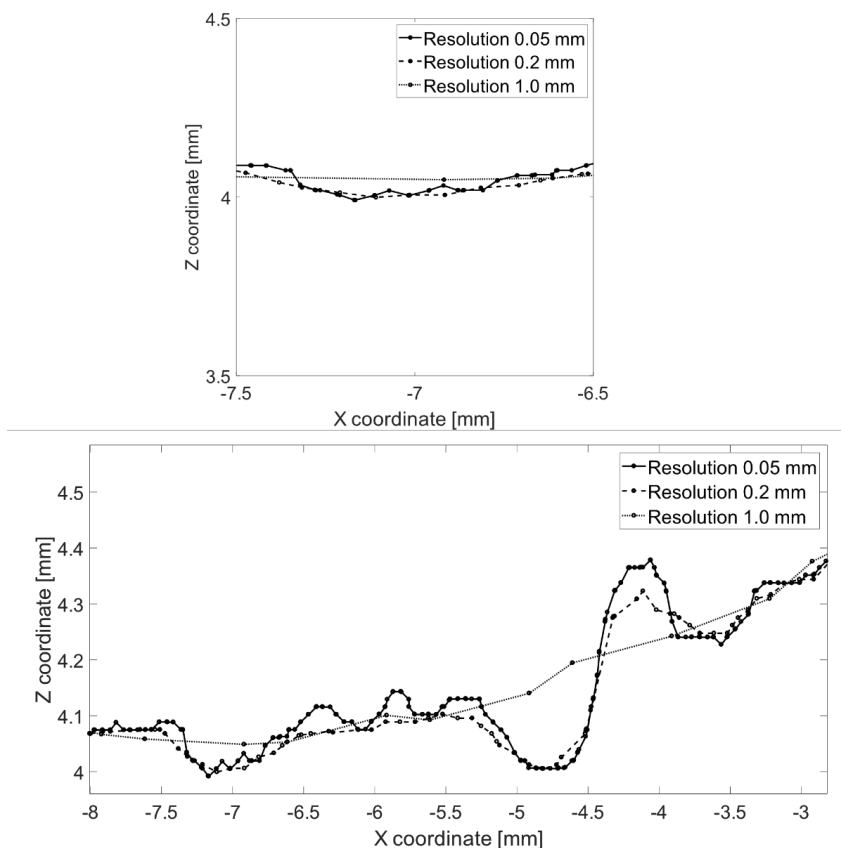
Varje sprickyta tillsammans med ingjutning och provhållarnas topppytor 3D-skannades före och efter skjuvtesterna. Skanningen gjordes med en skanner av typen Artec Spider baserad på strukturerat blått LED – ljus från Artec 3D. Arbetsprincipen var att en serie

överlappande bilder skapades med den handhållna skannern under det att objektet roterades sakta. För att erhålla en 3D-modell måste skanningdatan post-processeras genom att rumsligt positionera bilderna relativt varandra och ta bort överlappande områden. Detta gjordes i mjukvaran Artec Studio (versionerna 2011 – 2013) där en texturerad 3D-modell skapades. Under denna process bibehölls punkternas i molnets ursprungliga lägen, det vill säga att ingen filtrering gjordes. I ett sista steg transformerades punktmolnet till en modell bestående av triangulära plan i STL-format (stereolithography).

En studie för val av upplösning, det genomsnittliga punktavståndet, genomfördes. Figur 19 visar samma tvärsnitt för olika upplösningar. Det framgår att ett genomsnittligt punktavstånd på 1.0 mm rundar av profilen betydligt och att ett genomsnittligt punktavstånd på 0.05 mm tenderar att innehålla brus.

I en stor del av publicerade arbeten har interpolering till koordinatpunkter till rutformiga nät gjorts. Indraratna et al. (2014) använde ett konstant punktavstånd $\Delta x=0.5$ mm och Jiang et al. (2016) $\Delta x=0.1$ mm. Tatone et al. (2010) rapporterade att det genomsnittliga punktavståndet på provkroppar för laboratorietester måste vara mindre än 0.5 mm för att korrekt kunna beskriva ytkaraktistiken på en detaljnivå relevant för skjuvning. Baserat på denna information tillsammans med det något brusiga utseendet för det nominella punktavståndet 0.05 mm, tillämpades upplösningen 0.2 mm på skanningen inom detta arbete. Avsikten med detta val var att uppnå en avvägning mellan behovet av att sträva efter ett så litet punktavstånd som möjligt utan att introducera brus som skulle kunna påverka resultaten från analyserna.

Sprickornas kontaktytor avbildades före och efter skjuvtesterna genom att placera en tryckkänslig film mellan sprickytorna och applicera 5 MPa normalspänning med provkroppen monterad i skjuvtestutrustningen. Filmen var av typen LW Prescale, som ingår i FPD-8010E Fujifilm Pressure Distribution Mapping System. Detta system inkluderar utöver den tryckkänsliga filmen en mjukvara, kalibreringsfilm och skanner. Avtrycken i filmen efter belastning avläses i en skanner som ger en digital avbildning av kontaktytan, som mjukvaran sedan tolkar och kvantifierar.



Figur 19. Upplösningens (det genomsnittliga punktavståndets) inverkan på ytråheten illustrerad på ett tvärsnitt av en inskannad yta (nedre) och detalj av tvärsnittet med samma skala på axlarna (övre).

Figure 19. The influence of the resolution (the average point spacing) on the surface roughness illustrated on a cross section of a scanned surface (lower) and a detail of the cross section with the same scale on the axes (upper).

3.3 Resultat från direkta skjuvtester

Testerna genomfördes i en skjuvtestutrustning av modellen DSH-300 tillverkad av GCTS med 300 kN lastkapacitet i både normal- och skjuvriktningen. Lasterna mättes av en lastcell i vardera riktningen. Normalförskjutningarna mättes av fyra lägesgivare och horisontalförskjutningarna av en.

Före varje skjuvtest konsoliderades provkroppen genom att den utsattes för fyra normalbelastningscykler. Efter att ha lagt på en förlast på 0.1 MPa cyklades lasten i intervallet 0.5 – 12 MPa med 10 MPa/min.

De direkta skjuvtesterna utfördes under randvillkoret CNL med normallasten 5 MPa anbringad med 5.0 MPa/min under skjuvhastigheten 0.5 mm/min till dess att 10 mm skjuvförskjutning uppnåtts. Beteckningar på replikor och respektive gjutformar med tillverkningsdatum visas i Tabell 1. Bergprovets beteckning är som tidigare nämnts N1-CNL. Tabellen innehåller även replikor som innehåller ”CNS” i filnamnen. Resultaten för skjuvtesterna på dessa replikor ingår inte i detta arbete, men har tagits med i analysen av ytjämförelserna med syftet att få ett så stort underlag som möjligt vid framtagningen av kvalitetssäkringsparametrarna som diskuteras i kapitel 4.

Tabell 1. Gjutformsbeteckningar, tillverkningsdatum, replikabeteckningar och datum för replikaavgjutning.

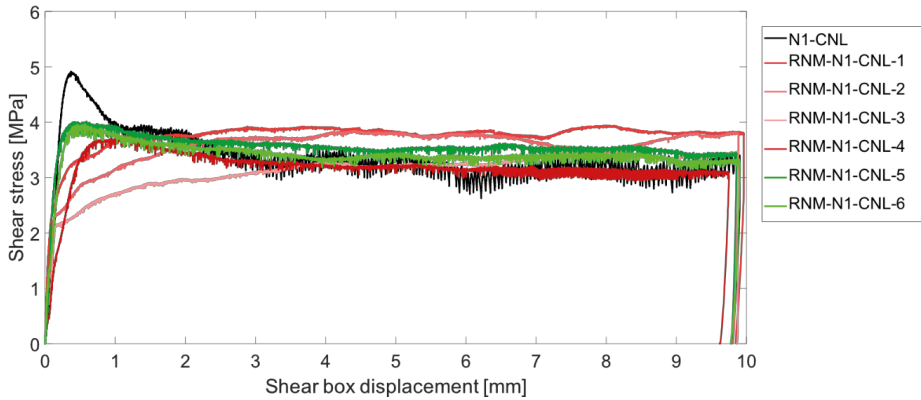
Table 1. Silicone mould designations, dates of manufacture, replica designations and replica casting dates.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Rock joint surface	Moulds		Replicas	
	Designation	Date of manufacture	Designation	Casting date
Upper part	1A-1	November 16 2017	RNM-N1-CNL-1U	December 14 2017
	1A-2	November 17 2017	RNM-N1-CNL-2U	December 14 2017
	1A-3	November 20 2017	RNM-N1-CNL-3U	December 7 2017
	1A-1	November 16 2017	RNM-N1-CNL-4U	May 7 2018
	1A-3	November 20 2017	RNM-N1-CNL-5U	May 7 2018
	1A-2	November 17 2017	RNM-N1-CNL-6U	May 7 2018
	Lower part	1B-5	November 22 2017	RNM-N1-CNL-1L
1B-9		November 28 2017	RNM-N1-CNL-2L	December 14 2017
1B-6		November 23 2017	RNM-N1-CNL-3L	December 14 2017
1B-5		November 22 2017	RNM-N1-CNL-4L	May 7 2018
1B-6		November 23 2017	RNM-N1-CNL-5L	May 7 2018
1B-9		November 28 2017	RNM-N1-CNL-6L	May 7 2018
1B-4		November 21 2017	RPM-N1-CNL-1L	December 7 2017
1B-7		November 24 2017	RPM-N1-CNL-2L	December 7 2017
1B-8		November 27 2017	RPM-N1-CNL-3L	December 7 2017
1B-4		November 21 2017	RPM-N1-CNS-1L	March 1 2018
1B-7		November 24 2017	RPM-N1-CNS-2L	March 1 2018
1B-8		November 27 2017	RPM-N1-CNS-3L	March 1 2018
1B-5		November 22 2017	RPM-N1-CNS-4L	March 1 2018
1B-6		November 23 2017	RPM-N1-CNS-5L	March 1 2018
1B-9		November 28 2017	RPM-N1-CNS-6L	March 1 2018

Resultaten över skjuvspänning som funktion av skjuvförskjutning för RNM framgår av Figur 20 (resultaten för RPM-N1-CNL diskuteras i avsnitt 4.5). Det framgår att bergprovet N1-CNL har högst skjuvhållfasthet och att de olika replikorna i varierande

utsträckning skiljer sig från bergprovets både med avseende på skjuvhållfasthet och på skjuvhållfasthetskaraktistiken generellt. Vad detta beror på diskuteras i det följande.



Figur 20. Skjuvspänning som funktion av skjuvförskjutning för bergprovet N1-CNL tillsammans med motsvarande replikor med naturlig passning (RNM).

Figure 20. Shear stress over shear displacement for the rock joint N1-CNL along the corresponding replicas with natural match (RNM).

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

4. KVALITETSSÄKRING AV REPLIKOR

Eftersom alla bergsprickor är unika är användningen av replikor ett potentiellt alternativ vid genomförandet av parameterstudier. Denna typ av studier utgör ett bra verktyg både vid utvecklingen och vid valideringen av skjuvhållfasthetskriterier genom att inverkan av enskilda parametrar på skjuvhållfasthetskaraktistiken kan undersökas. Detta görs genom att i skjuvhållfasthetstester variera en parameter åt gången med övriga parametrar och förutsättningar fixa.

Exemplen i litteraturen är många där replikor använts i olika typer av studier, exempelvis Asadizadeh et al. (2018); Jiang et al. (2019); Kumar et al. (2016); Lee et al. (2014), Shrivastava et al. (2015); Shrivastava et al. (2018) och Zhang et al. (2016). Gemensamt för dessa studier är att endast en replika per parameterinställning användes. Detta innebär att det inte var möjligt att utvärdera spridningen i resultaten, vilket i sin tur innebär att det inte gick att uttala sig om de observerade skillnaderna utgjordes av effekten av påverkan på målvariabeln eller en effekt av olika egenskaper mellan replikorna.

Utöver kännedom om spridningen mellan replikorna är det också viktigt att känna till hur stor denna spridning är i förhållande till avvikelserna relativt bergprovet. Även i de fall möjligheter att genomföra denna typ av analys finns det inga resultat rapporterade (Liu et al. 2018; Xia et al. 2018).

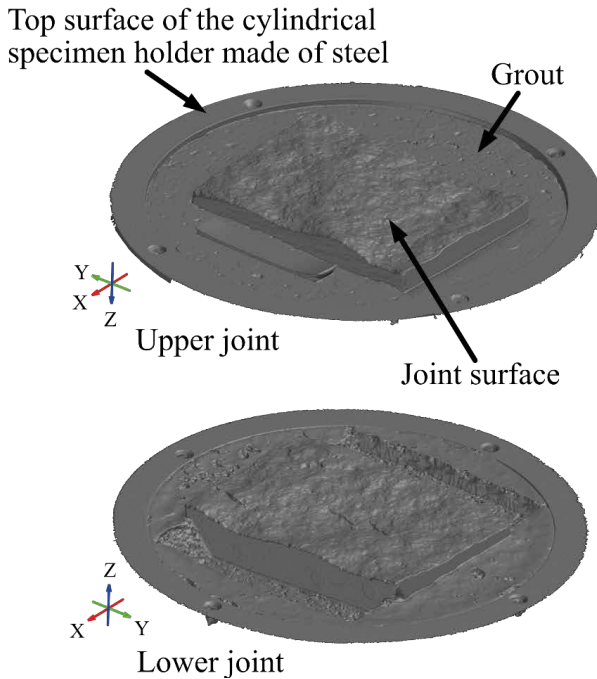
Den enda studien som hittats inom vilken direkta jämförelser mellan bergprov och replikor gjorts är av Singh et al. (2018). Resultaten visade signifikanta skillnader mellan bergproven och replikorna. Skjuvförskjutningarna vid maximal skjuvspänning var större för bergproven och förklarades med att replikorna hade en lägre hållfasthet. Även i detta arbete studerades dock endast en replika per parameterinställning och den eventuella inverkan av skillnader i sprickgeometri diskuterades inte.

Ansatsen i detta arbete har därför varit att först ta fram förslag på geometriska kvalitetssäkringsparametrar. Syftet är att före genomförandet av testerna baserat på skanningdata beräkna värdet på kvalitetsäkringsparametrarna. Om dessa underskrider vissa gränsvärden är det också säkerställt att observerade skillnader i skjuvhållfasthetskaraktistiken mellan bergprov och replikor inte beror på geometriska avvikelser. För att kunna uttala sig om detta presenteras därför därefter en analys som visar på kopplingen mellan kvalitetssäkringsparametrarna och utfallet från direkta skjuvtester. Avslutningsvis förs ett resonemang kring andra faktorer som inverkan på skillnader i skjuvhållfasthetskaraktistiken mellan bergprov och replikor än de rent geometriska.

4.1 Kvalitetssäkringsparameter med avseende på morfologi

Av grundläggande intresse att utvärdera när det gäller geometri är de rent morfologiska (formrelaterade) skillnaderna mellan sprickytorna. Detta gjordes genom att importera

STL-filerna innehållande skanningdatan till den kommersiellt tillgängliga mjukvaran GOM Inspect 2018 inom (<https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>) vilken positionerings- och ytjämförelseprocedurerna genomfördes. Mjukvaran är utvecklad för kontrollmätningar mellan nominella data, i detta fall bergprovets sprickytor, och faktiska data, replikornas sprickytor. Mjukvaran har inbyggda rutiner för kvantifiering och illustrering av skillnaderna mellan två objekt. I industriella tillämpningar jämförs typiskt den nominella CAD-modellen mot mesh genererade från skanning av tillverkade objekt. Koordinatsystemets orientering relativt sprickytorna framgår av Figur 21.

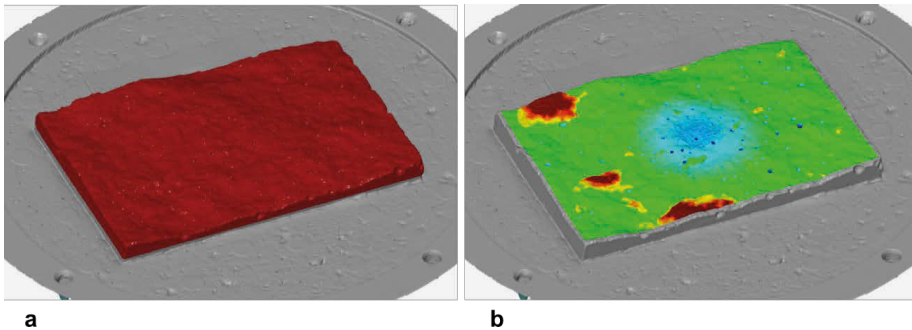


Figur 21. Koordinatsystemets orientering relativt sprickytorna.

Figure 21. The orientation of the coordinate system relatively to the crack surfaces.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

För att utvärdera avvikelserna med avseende på morfologi gjordes inpassningen mellan bergprovet och replikorna med avseende på sprickytorna och dess vertikala ytor enligt Figur 22, som också visar ett exempel på resulterande ytavvikelser. Utvärderingarna gjordes i vertikalriktningen (normalbelastningsriktningen) för varje skanningpunkt i replikorna.



Figur 22.

a. Inpassningen mellan bergprovet och replikorna med avseende på morfologin gjordes med avseende på de i rött markerade ytorna.

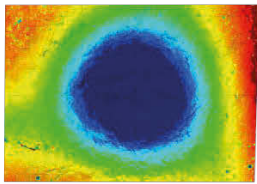
b. Exempel på resulterande ytavvikelser mellan bergprov och replika.

Figure 22.

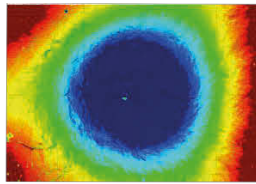
a. The alignment between the mother rock joint and the replicas with respect to morphology was done based on the in red highlighted surfaces.

b. Example on resulting surface deviations between the mother rock joint and the replicas.

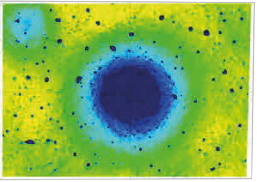
Figur 23 och Figur 24 visar resultaten för under- respektive överdelarna. Fyra typer av avvikelser kan observeras: porer, cirkulära negativa avvikelser i mitten, fragment med positiva avvikelser och positiva avvikelser längs kanterna. Genom att jämföra med tidpunkterna för tillverkningen av gjutformarna och replikaavgjutningarna med vilken typ av ytavvikelser som finns för de olika replikorna framgår att avvikelserna kunde elimineras eller kraftigt reduceras med tiden. Porerne härrörde från luftbubblor som uppkom under gjutprocessen av replikorna och kunde reduceras genom att initialt endast fylla ett tunt lager betong som noggrant rördes om innan efterföljande stegvis betongpåfyllning under ökad vibrering.



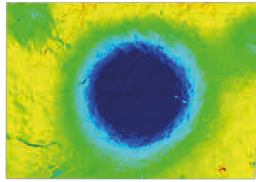
RPM-N1-CNL-1L, Mould 1B-4



RPM-N1-CNS-1L, Mould 1B-4



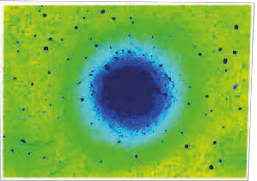
RNM-N1-CNL-1L, Mould 1B-5



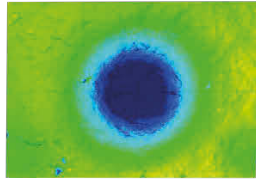
RPM-N1-CNS-4L, Mould 1B-5



RNM-N1-CNL-4L, Mould 1B-5



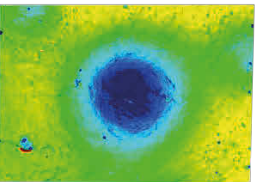
RNM-N1-CNL-3L, Mould 1B-6



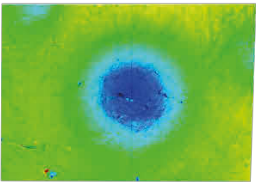
RPM-N1-CNS-5L, Mould 1B-6



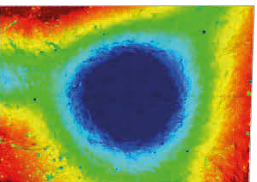
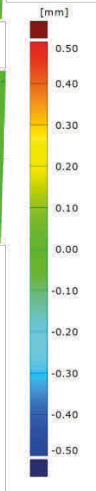
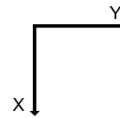
RNM-N1-CNL-5L, Mould 1B-6



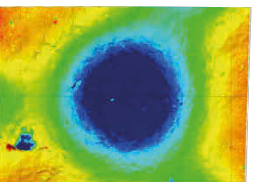
RPM-N1-CNL-2L, Mould 1B-7



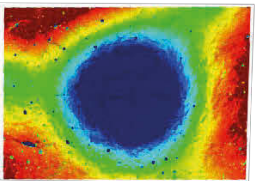
RPM-N1-CNS-2L, Mould 1B-7



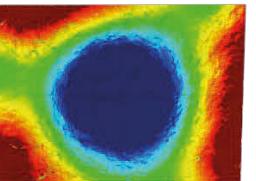
RPM-N1-CNL-3L, Mould 1B-8



RPM-N1-CNS-3L, Mould 1B-8



RNM-N1-CNL-2L, Mould 1B-9



RPM-N1-CNS-6L, Mould 1B-9

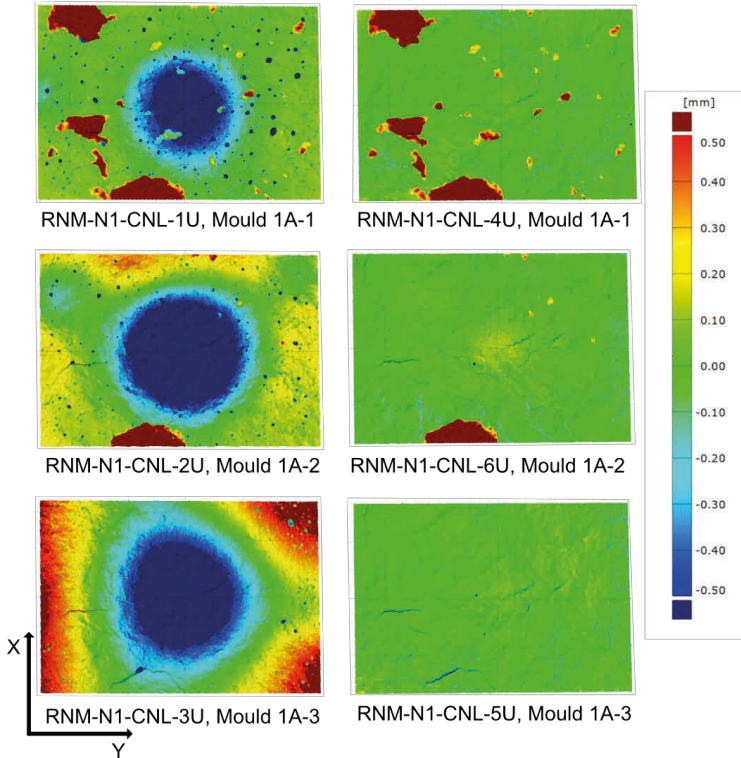


RNM-N1-CNL-6L, Mould 1B-9

Figur 23. Ytjämförelser mellan bergprovets och replikornas underdelar med avseende på morfologi. Skalan är satt till ± 0.5 mm. Positiva värden indikerar att replikaytan ligger över bergets. Varje rad innehåller replikor tillverkade från samma gjutform och kronologiskt växande tillverkningsdatum från vänster till höger.

Figure 23. Surface comparisons between the mother rock and the replicas with respect to morphology showing deviations of the lower joint surface. The legend limits are ± 0.5 mm. Positive deviations corresponds to areas on the replicas laying above the mother rock joint surface. Each row contains replicas manufactured from the same mould and in chronologically increasing order of date of manufacturing from left to right.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 24. Ytjämförelser mellan bergprovets och replikornas överdelar med avseende på morfologi. Skalan är satt till ± 0.5 mm. Positiva värden indikerar att replikaytan ligger över bergets.

Figure 24. Surface comparisons between the mother rock and the replicas with respect to morphology showing deviations of the upper joint surface. The legend limits are ± 0.5 mm. Positive deviations corresponds to areas on the replicas laying above the mother rock joint surface.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

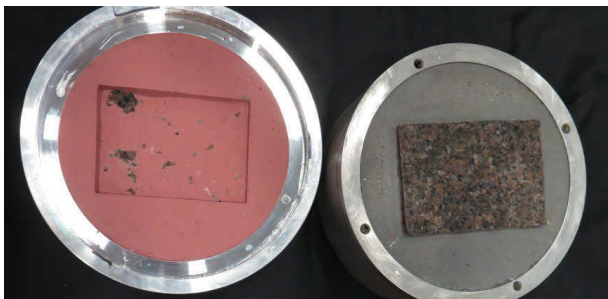
De cirkulära negativa avvikelserna i mitten av sprickytorna visade sig ha sitt ursprung i att styrtappen i gjutformarna för positionering mot täcklocket inte kunde bringas i rätt position. Detta resulterade i att gjutformen erhöll en konvex form genom att den inte låg fullt an mot botten av täcklocket. Efter det att styrtapparna avlägsnats eliminerades denna typ av avvikelse (Figur 25). Styrtapparnas tänkta funktion, utöver att fixera gjutformen mot täcklockets botten, var att fixera gjutformen koncentriskt relativt täcklocket. Avlägsnandet av styrtapparna hade dock ingen inverkan på detta eftersom gjutformen centrerades genom passningen mellan ytterkanten på gjutformen och sargen på täcklocket.



Figur 25. Gjutform med styrtapp (till vänster) och med styrtappen avlägsnad (till höger).

Figure 25. Mould with knobs (to the left) and with the knobs removed (to the right).

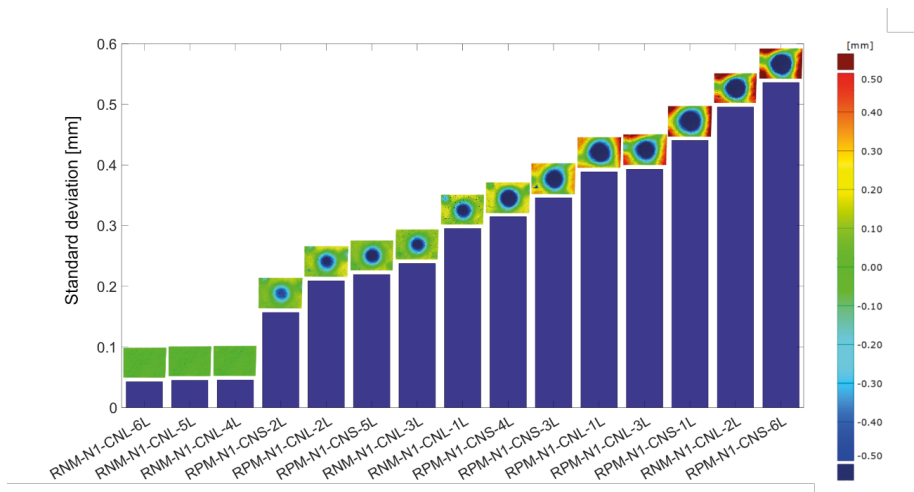
Replikorna tillverkade från formarna 1A-1 och 1A-2 i Figur 24 uppvisar lokala områden med distinkta stora positiva avvikelser. Förklaringen till detta är att fragment lossnade från bergprovets sprickyta vid avformning av gjutformarna efter att silikonet härdat (Figur 26). Detta framgår av kopplingen mellan den kronologiska tillverkningsordningen av gjutformarna (Tabell 1) och variationen av förekomsten av de distinkta avvikelserna mellan replikorna. Tendenserna till positiva avvikelser längs kanterna, vilka mest tydligt framgår i RNM-N1-CNL-2L, -3U; RPM-N1-CNL-1L, 3L och i RPM-N1-CNS-1L, -3L, -6L, är en konsekvens över att kanterna på gjutformen tryckts ned för hårt i samband med försöken att pressa de tidigare nämnda styrtapparna på plats mot locket. Denna typ av ytavvikelse försvann i samband med att styrtapparna avlägsnades.



Figur 26. Fragment som släppt från bergprovets sprickyta vid avformning av gjutform 1A-1 efter härdning.

Figure 26. Fragments coming loose from the rock joint surface during separation of mould 1A-1 after curing.

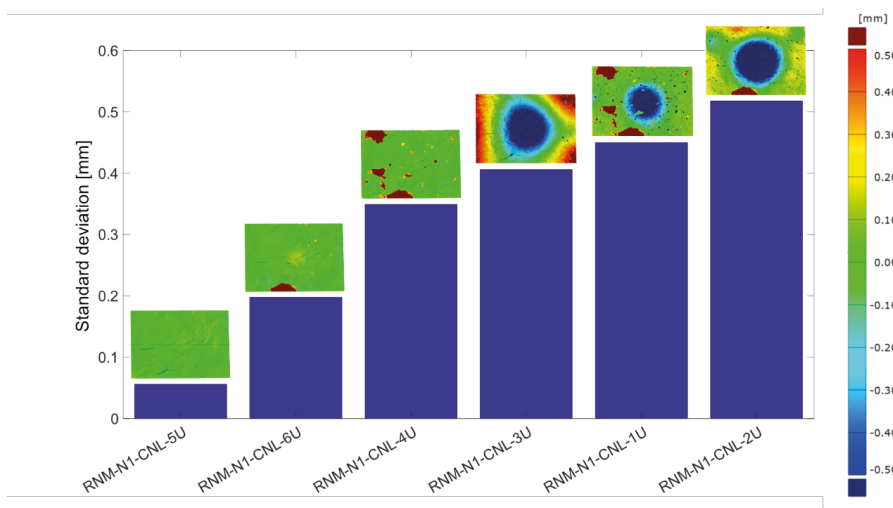
Med ytjämförelserna tillgängliga var nästa steg att försöka finna en parameter som beskriver de morfologiska skillnaderna. Det finns många parametrar som beskriver ytråheten, men i detta fall är det avvikelser mellan ytor som är av intresse snarare än ytorna själv. Extremvärden är inte lämpliga eftersom en lokal signifikant defekt, till exempel en por, skulle ge en missvisande beskrivning av en yta med i övrigt små ytavvikelser. Det är inte heller lämpligt att använda medelvärdet av avvikelserna för koordinatpunkterna, eftersom två ytor med helt olika utseende ändå skulle kunna ha samma medelvärde. Standardavvikelseerna för koordinatpunkternas avvikelser ser däremot ut att kunna beskriva de morfologiska avvikelserna eftersom denna parameter beskriver fördelningen av avvikelserna. Detta framgår av Figur 27 och Figur 28, som visar standardavvikelseerna för koordinatpunkternas avvikelser för de undre respektive de övre replikaytorna tillsammans med miniatyrer av de morfologiska ytjämförelserna i Figur 23 och Figur 24. Här framgår det också att det är möjligt att tillverka replikor med hög reproducerbarhet och att den föreslagna övre gränsen för godkänd morfologisk avvikelse uttryckt i termer av standardavvikelsen för koordinatpunkternas avvikelser, här betecknad σ_{mf} , är 0.06 mm.



Figur 27. Ytjämförelser med avseende på morfologi mellan den undre sprickytan på berg och replikor, tillsammans med staplar som visar de motsvarande standardavvikelserna för koordinatpunkterna i ytjämförelserna.

Figure 27. Surface comparisons with respect to morphology between the lower joint surface of the mother rock and the replicas, along bars showing the corresponding standard deviations of the coordinate points in the surface comparisons.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 28. Ytjämförelser med avseende på morfologi mellan den övre sprickytan på berg och replikor, tillsammans med staplar som visar de motsvarande standardavvikelseerna för koordinatpunkterna i ytjämförelserna.

Figure 28. Surface comparisons with respect to morphology between the upper joint surface of the mother rock and the replicas, along bars showing the corresponding standard deviations of the coordinate points in the surface comparisons.

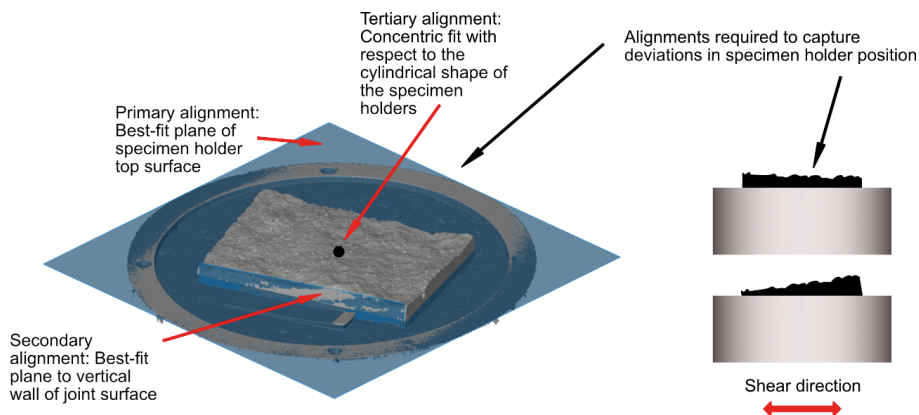
Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

4.2 Kvalitetssäkringsparameter med avseende på läget relativt provhållarna

Utöver att själva morfologin mellan bergprov och replika måste stämma överens som en förutsättning för att kunna använda replikor för parameterstudier behöver även sprickytornas läge relativt provhållaren stämma överens. Detta eftersom provhållarnas fixering i skjvtestutrustningen styr hur sprickytorna kommer att vara orienterade i förhållande till varandra. Det går att föreställa sig en replika som har sprickytor som överensstämmer med bergprovet morfologiskt perfekt. Replikatets sprickytor skiljer sig dock relativt provhållarnas toppytor i det att de ligger förskjutna i provhållarens toppytas plan och/eller ifall sprickytornas medelytors normaler har vinkelavvikelser. Detta skulle i så fall resultera i olika initiala kontaktytor och, ifall avvikelserna är tillräckligt stora, ej jämförbara resultat från direkta skjvtester.

För att fånga upp denna typ av avvikelser behöver en annan typ av inpassning mellan bergprov och replika göras jämfört med vad som krävdes för att fånga de morfologiska avvikelserna. Den primära uppriktningen gjordes med avseende på provhållarnas toppytor och sekundärt med avseende på parallellitet av skärningslinjerna mellan provhållarnas toppytor och provytornas bäst anpassade plan för långsidorna med

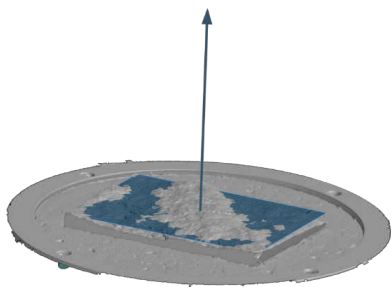
positiva x-koordinater. Slutligen tertiärt genom inpassning av de cirkulära provhållarnas mittpunkter (Figur 29).



Figur 29. Element använda för inpassning mellan bergprov och replikor för utvärdering av avvikelser med avseende på sprickyornas läge relativt provhållaren, tillsammans med en illustration av inverkan av läget relativt provhållaren.

Figure 29. Features used for alignment between the mother rock joint and the replicas for evaluation of deviations with respect to specimen holder position, along with an illustration of the influence of the position with respect to the specimen holder.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

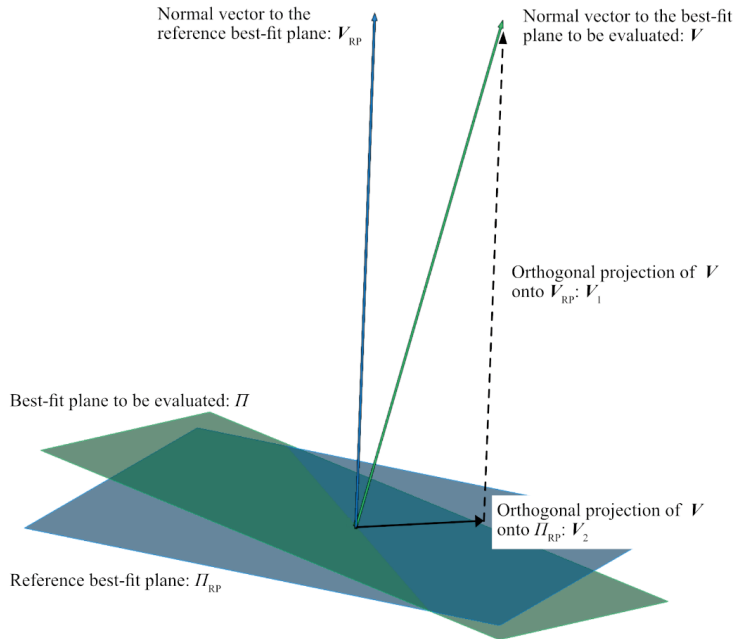


Figur 30. Illustrativt exempel på ett bäst anpassat plan till en sprickyta och normalvektorn till planet med längden 100 mm.

Figure 30. Illustrative example of a best-fit plane of a joint surface and the normal vector to the plane with a length of 100 mm.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Med utgångspunkt från den beskrivna upprikningen kan skillnaderna i läge relativt provhållarna utvärderas genom att till varje sprickyta först ta fram dess bäst anpassade plan med tillhörande normalvektor. I detta fall valdes längden på vektorn till 100 mm eftersom denna längd visade sig vara lagom för att kunna illustrera skillnaderna, men längden kunde valts godtyckligt (Figur 30).



Figur 31. Normalvektorn till planet som skall utvärderas, ortogonalt projicerad till det bäst anpassade referensplanet, innehåller information om avvikelsen mellan planen både med avseende på storlek och på riktning.

Figure 31. The normal vector to the plane to be evaluated, orthogonally projected onto the reference best-fit plane, contains information about the deviation between the planes, both with respect to magnitude and direction.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Med hjälp av linjär algebra och med hänvisning till Figur 31 kan därefter projektionen av normalvektorn V (normalvektorn till replikatets bäst anpassade plan II) på det bäst anpassade referensplanet I_{RP} (det bäst anpassade planet till bergprovets sprickyta) beräknas som

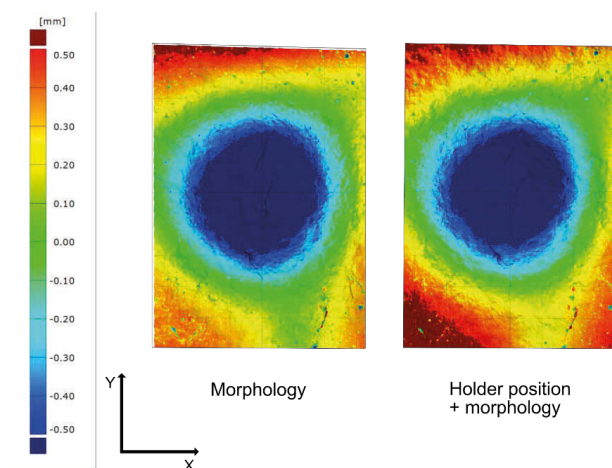
$$V_2 = V - V_1 = V - \frac{V \cdot V_{RP}}{|V_{RP}|^2} V_{RP} \quad (7)$$

där V_{RP} är normalvektorn till bergprovets sprickyta. Den projicerade vektorns koordinater är i detta läge uttryckt med avseende på det globala koordinatsystemet: x-axeln vinkelrät mot skjuvriktningen i horisontalplaner, y-axeln parallell med

skjuvriktningen, z-axeln parallell med normalbelastningsriktningen. Genom att göra ett basbyte kan koordinaterna istället uttryckas med z-axeln parallell med V_{RP} och y-axeln fortsatt parallell med skjuvriktningen. Detta innebär att de projicerade vektorerna istället betraktas från en punkt på V_{RP} med blicken mot I_{RP} , vilket är den riktning de projicerade vektorerna skall observeras från för att beskriva deras verkliga längder och riktningar. Detta kan även uttryckas som att vektorerna betraktas med blicken riktad rakt uppifrån (vinkelrätt) mot bergprovets sprickyta.

Att det finns ett bidrag till de totala geometriska avvikelserna mellan bergprov och replika från skillnader i läget relativt provhållarna kan kvalitativt illustreras genom ett exempel där avvikelserna beräknats på samma sätt som beskrivits i avsnitt 4.1 med inpassningar både med avseende på morfologi respektive läge relativt provhållaren. Inpassningen med avseende på morfologi görs, som tidigare diskuterats i avsnitt 4.1 och visats i Figur 22, genom att låta replikans och bergprovets sprickytor röra sig fritt relativt varandra till ett läge där avvikelserna är minimerade. Inpassningen med avseende på läget relativt provhållaren görs å andra sidan genom att styra uppriktningen så att både replikans och bergprovets toppytor på provhållarna tvingas vara parallella enligt Figur 29. Resultatet visas i Figur 32 och genom att jämföra färgmappningarna framgår det att det finns skillnader i det att underkanten ligger högre när uppriktningen gjorts med avseende på läget relativt provhållaren. Det kan alltså konstateras att det finns ett bidrag till de totala avvikelserna från läget relativt provhållaren. Beroende på hur de morfologiska avvikelserna ser ut i förhållande till lägesavvikelse kan lägesavvikelse antingen bidra till att öka eller minska de totala avvikelserna. I detta exempel bidrar lägesavvikelse till att öka de totala avvikelserna.

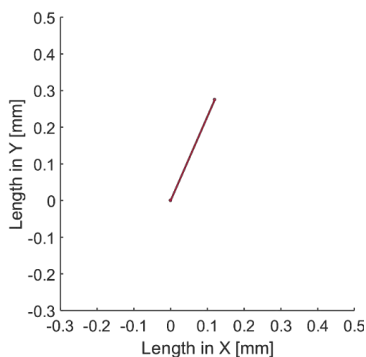
Uppriktningen gjord utifrån läget relativt provhållaren innehåller summan av bidragen från de morfologiska avvikelserna och själva lägesavvikelse. För att renodla bidragen från lägesavvikelse behöver därför även de projicerade vektorerna med avseende på morfologi (inpassning enligt Figur 22) tas fram i analogi med vad som beskrivits ovan för läget relativt provhållaren (inpassning enligt Figur 29). Dessa vektorer subtraheras därefter från vektorerna projicerade utifrån uppriktningen med avseende på läget relativt provhållaren. Resultatet för exemplet i Figur 32 återfinns i Figur 33. Här framgår att vektorn som beskriver avvikelserna relaterad till läget relativt provhållaren, betecknad V_{Hp100} , pekar snett uppåt i första kvadranten. Detta överensstämmer med de kvalitativa observationerna i Figur 32, det vill säga att den nedre halvan, och speciellt det nedre vänstra hörnet är förhöjt i bilden till höger i förhållande till den vänstra. Talet 100 i beteckningen refererar till den projicerade normalvektorns längd.



Figur 32. Exempel med hjälp av RPM-N1-CNL-1L som kvalitativt illustrerar att det finns ett bidrag från orienteringen relativt provhållaren till de totala avvikelserna utöver de morfologiska.

Figure 32. Example with help from RPM-N1-CNL-1L that qualitatively illustrates the existence of a contribution from the orientation relatively the specimen holder to the total deviations in addition to the morphological.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 33. Vektorn som beskriver skillnaden i läget relativt provhållaren för exemplet i Figur 32. Origo sammanfaller med centrum punkten på provkroppen och positiv y-riktning utgör skjuvriktningen (underdelens rörelseriktning relativt den fixa överdelen).

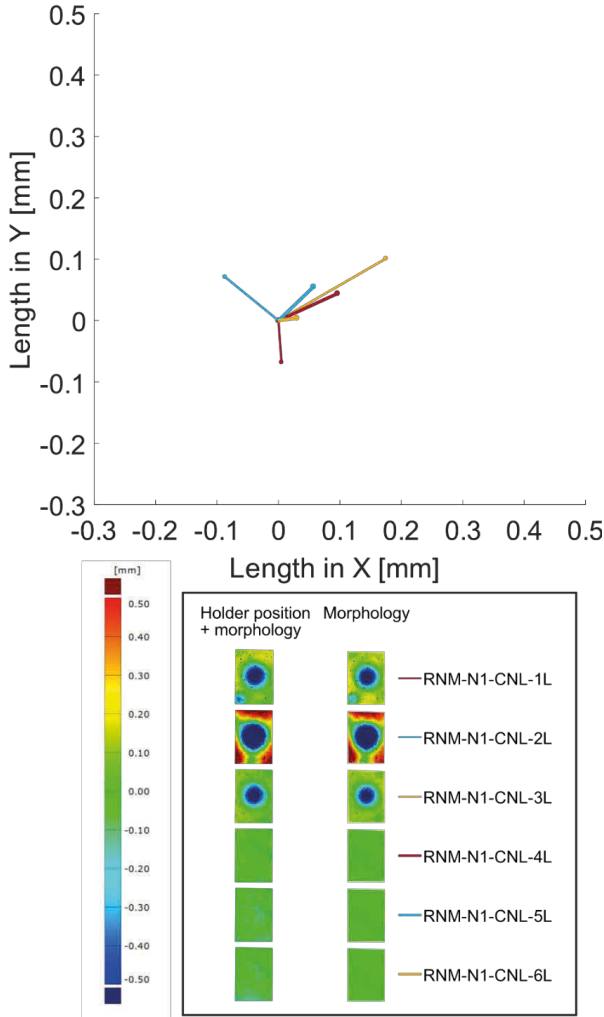
Figure 33. The vector that describes the deviation with respect to holder position in the example in Figure 32. Origin coincides with the centre point of the specimen and the positive y-axis constitutes the shear direction (the moving direction of the lower part relatively to the fixed upper part).

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

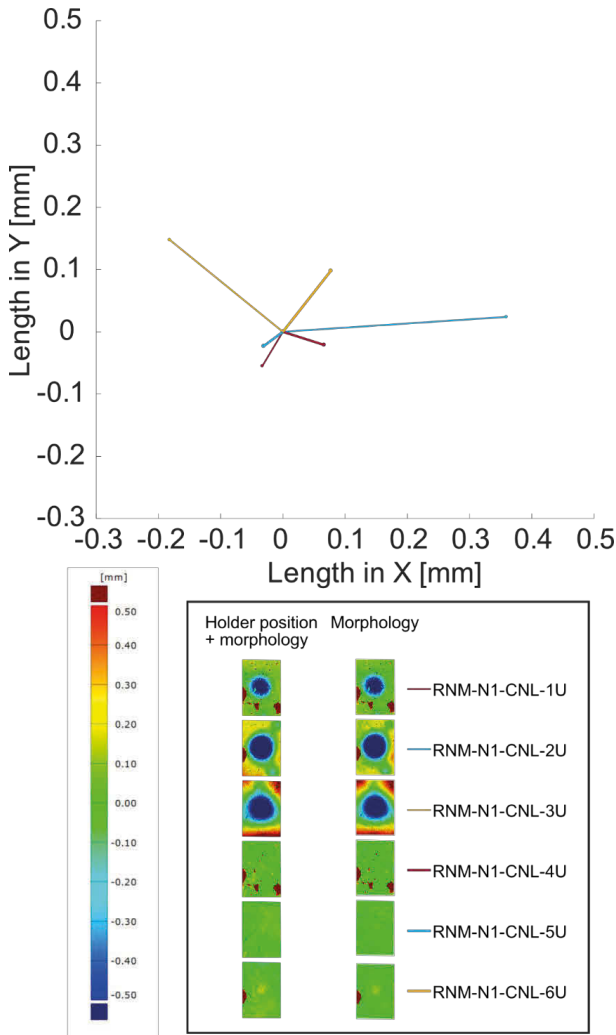
Med hjälp av denna vektor kan avvikelsen kvantifieras både med avseende på storlek (längden på vektorn) och riktning (till exempel vinkeln medsols relativt vektorn (0, 1, 0). Den övre bilden Figur 34 och Figur 35 visar projicerade vektorer för läge relativt provhållaren för under- respektive överdelarna för RNM. Den undre bilden visar miniatyrer av ytjämförelserna med avseende på morfologi och med morfologi + hållarposition. Bilden visar att riktning och storlek på de projicerade vektorerna överensstämmer med de visuella intrycken vid jämförelse mellan ytjämförelserna. Det framgår att både storlek och riktning på vektorerna varierar, vilket indikerar att det inte finns något systematiskt fel i tillverkningsprocessen av replikorna. Med kännedom om normalvektorns längd $|V| = 100$ mm i kombination med de projicerade normalvektorernas längder, $|V_{Hp100}|$, kan med hänvisning till Figur 31 vinkeln γ mellan V_{RP} och V beräknas som

$$\gamma = \sin^{-1} \frac{V_{Hp100}}{V} = \sin^{-1} \frac{V_{Hp100}}{100}. \quad (8)$$

Resultaten för underdelarna redovisas i Tabell 2 och för överdelarna i Tabell 3 där V_M är de projicerade vektorerna med avseende på morfologi, $V_{Hp100+M}$ med avseende på den sammanlagda effekten av morfologi och läget relativt provhållaren och V_{Hp100} med avseende på läget relativt provhållaren beräknad som $V_{Hp100+M} - V_M$. Bidraget till avvikelserna mellan bergprov och replikor härrörande från skillnaderna i läge relativt provhållaren uttryckt i γ ter sig alltså litet och ligger i intervallet $0.02 - 0.21^\circ$. Vilken inverkan dessa avvikelser har på utfallet från skjuvtesterna och vilket gränsvärde som är lämpligt att sätta för denna parameter diskuteras i avsnitt 4.3.



Figur 34. Övre figuren: Projicerade normalvektorer, V_{Hp100} , som beskriver replikornas till underdelarnas avvikelser relativt läget i provhållaren. Undre figuren: Ytjämförelser baserade på skanningdata med avseende på morfologi och med morfologi + hållarposition visas i anslutning till skalan för att underlätta tolkningen av resultaten. *Figure 34. Upper figure: Projected normal vectors, V_{Hp100} , representing the deviations of the lower part replicas relatively to holder position. Lower figure: The surface comparisons based on scanning data with respect to morphology and with morphology + holder position are shown in conjunction to the legend to facilitate interpretation of the results.*



Figur 35. Övre figuren: Projicerade normalvektorer, V_{Hp100} , som beskriver replikornas till överdelarnas avvikelser relativt läget i provhållaren. Undre figuren: Ytjämförelser baserade på skanningdata med avseende på morfologi och med morfologi + hållarposition visas i anslutning till skalan för att underlätta tolkningen av resultaten. *Figure 35. Upper figure: Projected normal vectors, V_{Hp100} representing the deviations of the upper part replicas relatively to holder position. Lower figure: The surface comparisons based on scanning data with respect to morphology and with morphology + holder position are shown in conjunction to the legend to facilitate interpretation of the results.*

Tabell 2. Komposanterna och längderna för vektorerna V_M , $V_{Hp100+M}$ och V_{Hp100} , samt γ för underdelarna.

Table 2. The components and lengths of the vectors V_M , $V_{Hp100+M}$ and V_{Hp100} and γ for the lower parts. The z components are omitted since they are zero.

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Designation	V_M [mm]			$V_M + V_{Hp100}$ [mm]			V_{Hp100} [mm]			γ [°]
	x	y	$ V_M $	x	y	$ V_M + V_{Hp100} $	x	y	$ V_{Hp100} $	
RNM-N1-CNL-1L	0.05	-0.01	0.05	0.05	-0.08	0.09	0.01	-0.07	0.07	0.04
RNM-N1-CNL-2L	0.15	0.02	0.15	0.06	0.09	0.11	-0.09	0.07	0.11	0.06
RNM-N1-CNL-3L	0.05	0.02	0.05	0.22	0.12	0.25	0.18	0.10	0.20	0.12
RNM-N1-CNL-4L	0.08	0.00	0.08	0.17	0.04	0.18	0.10	0.04	0.11	0.06
RNM-N1-CNL-5L	0.07	-0.02	0.07	0.13	0.04	0.13	0.06	0.06	0.08	0.05
RNM-N1-CNL-6L	0.09	-0.01	0.09	0.12	0.00	0.12	0.03	0.00	0.03	0.02
RPM-N1-CNL-1L	0.07	-0.02	0.08	0.19	0.26	0.32	0.12	0.28	0.30	0.17
RPM-N1-CNL-2L	0.06	-0.01	0.06	-0.03	0.12	0.13	-0.09	0.14	0.16	0.09
RPM-N1-CNL-3L	0.11	0.01	0.11	0.05	0.05	0.07	-0.07	0.04	0.08	0.04
RPM-N1-CNS-1L	0.10	0.02	0.10	0.01	0.30	0.30	-0.09	0.28	0.29	0.17
RPM-N1-CNS-2L	0.05	-0.01	0.05	0.08	0.20	0.21	0.03	0.21	0.21	0.12
RPM-N1-CNS-3L	0.06	0.05	0.08	0.26	0.20	0.33	0.19	0.15	0.24	0.14
RPM-N1-CNS-4L	0.12	0.06	0.14	0.10	0.11	0.15	-0.02	0.05	0.06	0.03
RPM-N1-CNS-5L	0.09	-0.02	0.09	0.26	0.10	0.28	0.17	0.11	0.21	0.12
RPM-N1-CNS-6L	0.13	0.03	0.13	0.41	0.06	0.42	0.29	0.03	0.29	0.16

Tabell 3. Komposanterna och längderna för vektorerna V_M , $V_{Hp100+M}$ och V_{Hp100} , samt γ för överdelarna.

Table 3. The components and lengths of the vectors V_M , $V_{Hp100+M}$ and V_{Hp100} and γ for the upper parts. The z components are omitted since they are zero..

Larsson et al. 2023a, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Designation	V_M [mm]			$V_M + V_{Hp100}$ [mm]			V_{Hp100} [mm]			γ [°]
	x	y	$ V_M $	x	y	$ V_M + V_{Hp100} $	x	y	$ V_{Hp100} $	
RNM-N1-CNL-1U	-0.03	0.30	0.30	-0.06	0.24	0.25	-0.03	-0.06	0.06	0.04
RNM-N1-CNL-2U	0.13	0.05	0.14	0.49	0.08	0.49	0.36	0.02	0.36	0.21
RNM-N1-CNL-3U	-0.08	-0.02	0.08	-0.26	0.13	0.30	-0.18	0.15	0.23	0.13
RNM-N1-CNL-4U	-0.05	0.26	0.27	0.02	0.24	0.24	0.07	-0.02	0.07	0.04
RNM-N1-CNL-5U	-0.08	-0.05	0.09	-0.11	-0.07	0.13	-0.03	-0.02	0.04	0.02
RNM-N1-CNL-6U	0.18	0.03	0.18	0.26	0.13	0.29	0.08	0.10	0.12	0.07

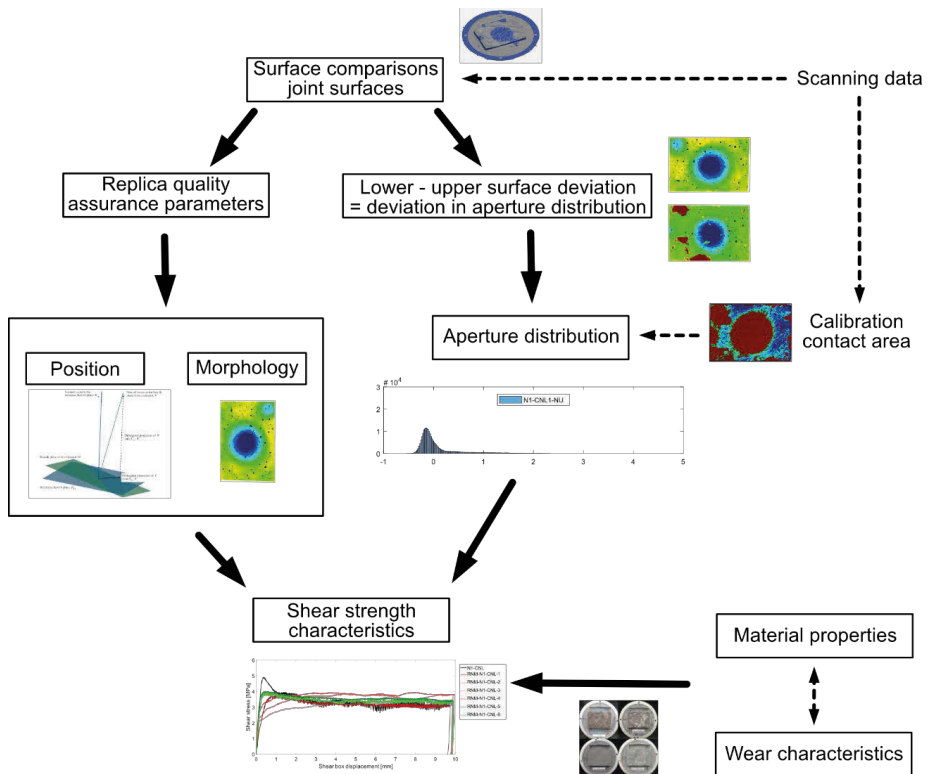
4.3 Parametrarnas koppling till utfallet från direkta skjuvtester

I de båda föregående avsnitten har förslag på geometriska kvalitetsäkringsparametrar med avseende på morfologi respektive läge relativt provhållaren presenterats. För att dessa parametrar skall vara praktiskt användbara behövs kopplingen mellan dessa parametrar och utfallet från skjuvtesterna påvisas. Innan detta görs diskuteras dock först frågan vilken inverkan avvikelserna relativt provhållarna har på utfallet från skjuvtesterna och vilket gränsvärde som är lämpligt att sätta för denna parameter.

Från Figur 20 framgår att RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 skiljer sig från övriga replikor i det att båda uppvisar den skjuvhållfasthetskaraktistik bland replikorna som bäst svarar mot bergprovets. Skillnaden i skjuvhållfasthetskaraktistik mellan dessa båda replika är dessutom liten. Detta innebär att de kan användas för att göra en bedömning av vilket genomslag avvikelser i läge relativt provhållaren har på skjuvhållfasthetskaraktistiken. Genom inbördes jämförelser mellan avvikelserna för under- och överdelarna i Figur 23 och Figur 24 framgår att RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 har små geometriska avvikelser, inom 0.1 mm, utom i det området av RNM-N1-CNL-6U där en bit av bergprovet lossnat under tillverkningen av gjutformarna. Jämfört med de andra replikorna stämmer RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 alltså geometriskt väl överens med bergprovet och bättre än övriga replikor, vilket återspeglas i skjuvhållfasthetskaraktistiken. Mot bakgrund av detta framgår från Tabell 2 och Tabell 3 att $|V_{Hp100}|$ är 0.08 mm och 0.04 mm för under- respektive överdelen till RNM-N1-CNL-5. Motsvarande värden för RNM-N1-CNL-6 är 0.03 mm respektive 0.12 mm. Från Figur 34 och Figur 35 framgår att för RNM-N1-CNL-5 pekar vektorerna för under- och överdelarna i princip i motsatt riktning, vilket ger en ungefärlig total avvikelse på $0.04 + 0.08 = 0.12$ mm. För RNM-N1-CNL-6 pekar båda vektorerna i ungefär samma riktning, vilket approximativt ger en total avvikelse mellan under- och överdel på $0.12 - 0.03 = 0.09$ mm. Skillnaden mellan vektorerna i under- och överdelarna är mått på hur lutningen skiljer sig mellan sprickytorna i under- och överdelarna. Detta är i sin tur ett mått på hur väl passade ytorna är. Skillnaden mellan 0.09 mm och 0.12 mm är att betrakta som liten och därför kan det sägas att passningen för de båda replikorna är densamma. Detta har dock ingen större betydelse eftersom överdelen i testerna var sfäriskt lagrad, vilket innebär att överdelen under de konsoliderande normalbelastningstesterna riktade in sig efter den fixerade underdelen. Det är alltså snarare underdelens vinkelavvikelse relativt bergprovet som skall ligga till grund för bedömningen av inverkan av lägets relativt provhållaren inverkan på skjuvhållfasthetskaraktistiken. Då skall alltså 0.08 mm för RNM-N1-CNL-5L jämföras med 0.03 mm för RNM-N1-CNL-6L. Uttryckt i absoluta värden är avvikelserna små. Dessa värden utgör komposanterna av de projicerade vektorerna från en 100 mm lång vektor, vilket enligt Tabell 2 motsvarar 0.05° respektive 0.02° . Relativt är skillnaderna dock stora, vilket inte återspeglas i någon motsvarande skillnad i skjuvhållfasthetskaraktistik. Eftersom de morfologiska avvikelserna för övriga replika är så stora i förhållande till genomslaget av vinkelavvikelserna i läge relativt

provhållaren går det inte att förutsäga vilken inverkan en avvikelse på maximalt enligt Ekv. (8) beräknade 0.21° (Tabell 3 för RNM-N1-CNL-2U) skulle ha på marginalen. Antagandet baserat på de tillgängliga resultaten är därför att skillnaderna i läget relativt provhållaren inte har någon avgörande betydelse för skjuvhållfasthetskaraktistiken så länge vinkelavvikelsen inte överskrider 0.2° motsvarande $|V_{Hp100}| = 0.35\text{mm}$.

Med utgångspunkt från ovanstående är nästa steg att diskutera kopplingen mellan de geometriska kvalitetsparametrarna för morfologi och läget relativt provhållaren. Gemensamt för parametrarna är att båda är kopplade till ytavvikelseerna i vertikalriktningen för varje skanningpunkt i sprickytorna mellan replika och berg. Morfologiparametern är direkt kopplad genom att den utgörs av standardavvikelsen för ytavvikelseerna. Till parametern som beskriver läget relativt provhållaren är kopplingen indirekt genom att skillnaden mellan ytavvikelseerna som enbart beskriver morfologin och ytavvikelseerna som beskriver både morfologin + läget relativt provhållaren är kopplad till den projicerade normalvektorn som beskriver avvikelsen i läget relativt provhållaren (Figur 32 och Figur 33). Ytavvikelseerna mellan replikor och bergprov är i sin tur indirekt kopplade till aperturfördelningen (avståndet mellan en provkroppss under- och överdelar). Kopplingen utgörs genom att skillnaden mellan ytavvikelseerna för en replikas under- och överdelar beskriver skillnaden i aperturfördelning i förhållande till bergprovet. För att slutföra resonemanget återstår att visa på kopplingen mellan aperturfördelningen och skjuvhållfasthetskaraktistiken. Figur 36 beskriver schematiskt de ovan beskrivna kopplingarna.

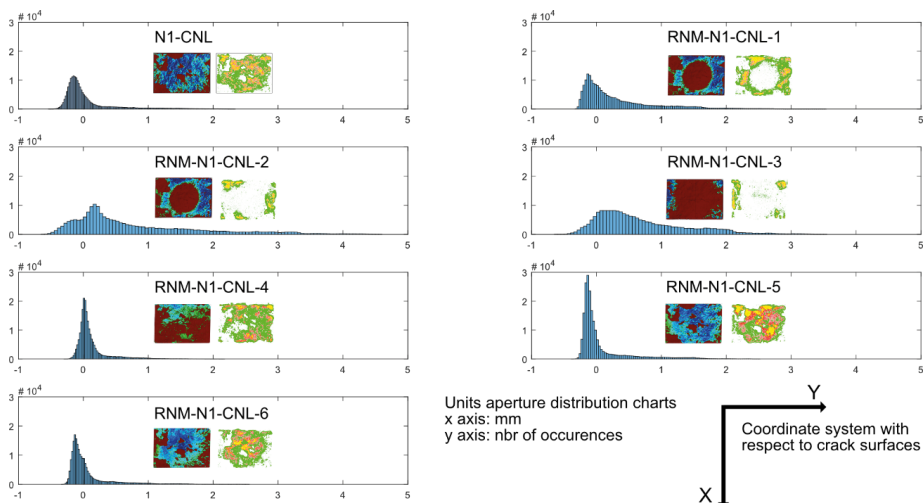


Figur 36. Schematisk illustration som visar att kvalitetssäkringsparametrarna är kopplade till skjuvhållfasthetskaraktistiken genom att parametrarna baseras på ytjämförelser, vilka är kopplade till aperturfördelningen som i sin tur är relaterad till skjuvhållfasthetskaraktistiken (heldragna pilar). Streckade pilar visar att både ytjämförelserna och aperturfördelningarna är framtagna baserade på skanningdata samt indikerar på kopplingen mellan materialegenskaper och nötningskaraktistik.

Figure 36. Schematic illustration showing the coupling between the quality assurance parameters to the shear strength characteristics through the parameters being based on surface comparisons, which are coupled to the aperture distribution which in turn is related to the shear strength characteristics (solid arrows). Dashed arrows indicate the relation of the scanning data to the surface comparisons and the aperture distributions, and also the coupling between material properties and wear characteristics.

Kontaktrycksmätningarna som utfördes med tryckkänslig film efter normalbelastningscyklerna, men innan skjuvtesterna, utgör en avbildning av kontaktytorna mellan sprickytornas under- och överdelar. Skanningdata kunde kalibreras genom att i vertikalled translatera de inskannade punktmolnen för under- och överdelarna relativt varandra tills dess att överensstämmelse med de genom tryckkänslig

film uppmätta kontaktytorna erhöles. Aperturfördelningen kunde därefter tas fram genom att för varje punkt i underdelarna beräkna det vertikala avståndet till motsvarande punkt i överdelarna och därefter sammanställa frekvensen över förekomsten för olika aperturavstånd.



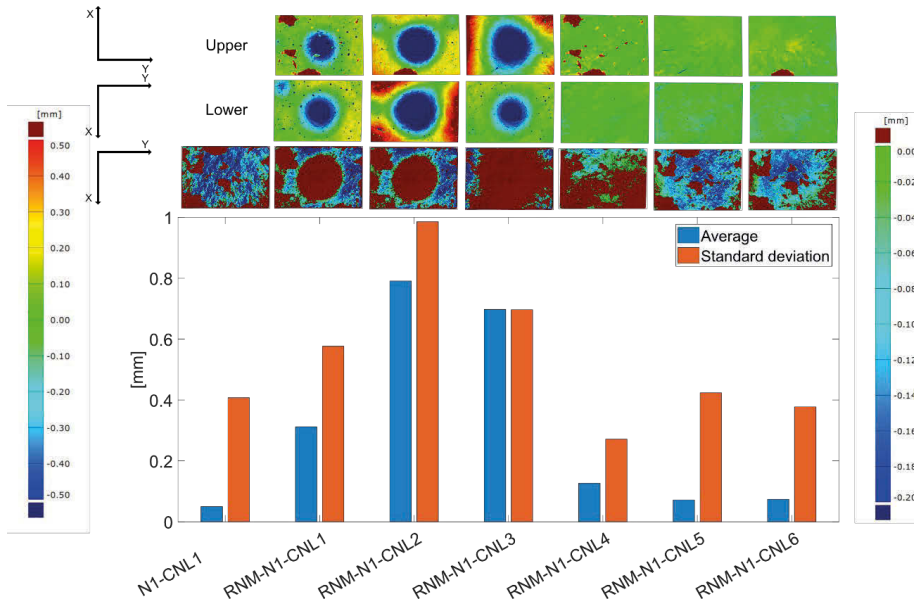
Figur 37. Aperturfördelningar beräknade på skanningdata (miniatyrerna till vänster) som kalibrerats mot uppmätta kontaktryck (miniatyrerna till höger).

Figure 37. Aperture distributions calculated from scanning data (the miniatures to the left) which have been calibrated against contact pressure measurements (the miniatures to the right).

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Resultaten visas i Figur 37 där uppmätta kontaktryck utgörs av miniatyrerna till höger och den kalibrerade skanningdatan till vänster om dessa. Förekomsten av negativa aperturvärden är sannolikt en indikation på de deformationer som vissa aperturer antas ha genomgått under det att mätningarna med 5 MPa tryck gjordes, vilket också var den spänning under vilken skjuvtesterna under CNL genomfördes. Antalet datapunkter varierar mellan cirka 195 000 och 207 000 mellan de olika provkropparna, vilket gör att jämförelser mellan olika provkroppar för antalet gånger ett visst aperturavstånd förekommer inte kan jämföras direkt. Däremot kan medelvärden och standardavvikelser som spridningsmått användas för jämförelser. Det framgår att medelvärdena av aperturfördelningarna korrelerar väl med det visuella intrycket av kontaktytorna, det vill säga att replikorna RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 är de som bäst matchar bergprovet N1-CNL. Även värdena på standardavvikelse korrelerar väl med det visuella intrycket från kontaktrycksmätningarna (Figur 38). Från miniatyrerna framgår vidare att underdelen till RNM-N1-CNL-4 visserligen stämmer väl överens med bergprovets, men att överensstämmelsen för överdelen inte är lika bra. Detta får genomslag kvalitativt på den initiala kontaktytan och kvantitativt på aperturfördelningen

i medelvärde och standardavvikelse. Genom jämförelse med Figur 20 framgår att aperturfördelningarnas medelvärden och standardavvikelser är kopplade till skjuvhållfasthetskaraktistiken. Detta innebär i sin tur även att de båda geometriska kvalitetssäkringsparametrarna, σ_{mf} (morfologi) och V_{Hp100} (läget relativt provhållaren), är kopplade till skjuvhållfasthetskaraktistiken, vilket demonstrerar dessa parametrars relevans för kvalitetssäkring av replikor för användning i direkta skjuvtester.



Figur 38. Medelvärden och standardavvikelser beräknade från kalibrerad skanningdata (miniatyrerna i tredje (nedersta) raden med tillhörande skala till höger) tillsammans med ytavvikelseerna med avseende på läget relativt provhållarna (första raden övre provhalvor, andra raden nedre provhalvor) med skalan till vänster. Miniaturer över ytavvikelse finns inte för bergprovet N1-CNL-1 eftersom ytavvikelseerna är beräknade med detta prov som referens.

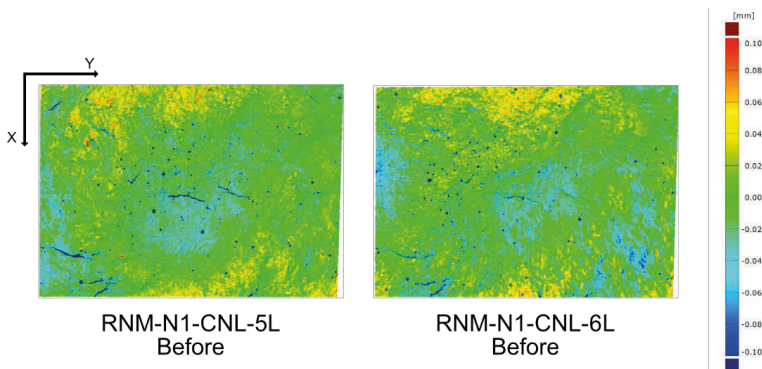
Figure 38. Averages and standard deviations calculated from calibrated scanning data (the miniatures in the third (the bottom) row with the corresponding scale to the right) along with the surface deviations with respect to the position in relation to the specimen holders (in the first row upper specimen halves, in the second row lower specimen holders) with the scale to the left. Miniatures of surface deviations to the mother rock joint N1-CNL-1 do not exist since the surface deviations are calculated with this specimen as reference.

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

4.4 Andra faktorerers inverkan än den rent geometriska på utfallet från direkta skjuvtester

Trots att de geometriska avvikelserna för under- och överdelarna för RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 är små relativt bergprovet N1-CNL, vilket innebär att även passningarna stämmer väl överens som framgår från Figur 38, finns det tydliga skillnader i skjuvhållfasthetskaraktistiken. Från Figur 20 framgår att replikorna förvisso har ungefär samma residualsjuvhållfasthet som bergprovet och att skjuvhållfasthetsmaximum nås vid ungefär samma skjuvförskjutning, men själva skjuvhållfastheten är tydligt lägre, cirka 4 MPa, för replikorna jämfört med cirka 5 MPa för bergprovet. Detta avsnitt analyserar vilka faktorer som kan tänkas förklara dessa skillnader.

Som framgår av Figur 23 är de morfologiska avvikelserna för underdelarna mellan bergprovet N1-CNL-L och replikorna RNM-N1-CNL-5L och -6L i båda fallen mycket små. Figur 39 visar samma bilder som i Figur 23, men istället med en finare skala, +/- 0.1 mm istället för +/- 0.5 mm. För större delen av sprickytorna är avvikelserna inom några hundradels millimeter upp till runt en tiondels millimeter i enstaka områden.

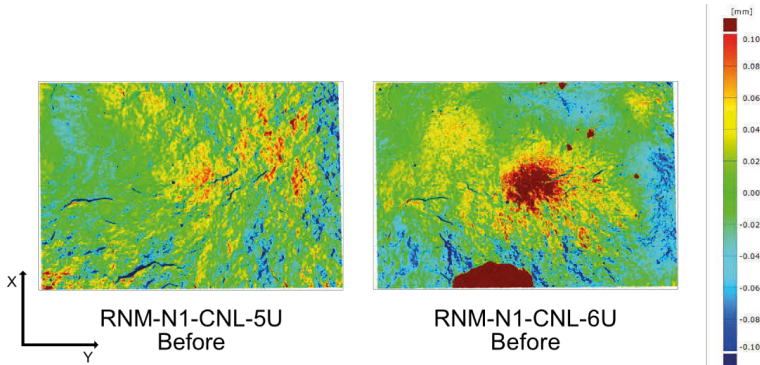


Figur 39. Morfologiska jämförelser mellan underdelarna RNM-N1-CNL-5L och RNM-N1-CNL-6L mot bergprovets underdel N1-CNL-L före skjuvtest.

Figure 39. Morphological comparisons between the lower parts RNM-N1-CNL-5L and RNM-N1-CNL-6L evaluated against the lower rock joint N1-CNL-L before shear test.

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Detsamma gäller för de morfologiska avvikelserna för överdelarna, undantaget ett område i nederkant på RNM-N1-CNL-6U där replikan ligger 1 mm högre än bergprovet. Detta beror på, som beskrivits i avsnitt 4.1, att en flaga följde med silikonformen vid gjutformstillverkningen. Det röda området i mitten av RNM-N1-CNL-6U ligger runt 0.15 mm för högt (Figur 40).

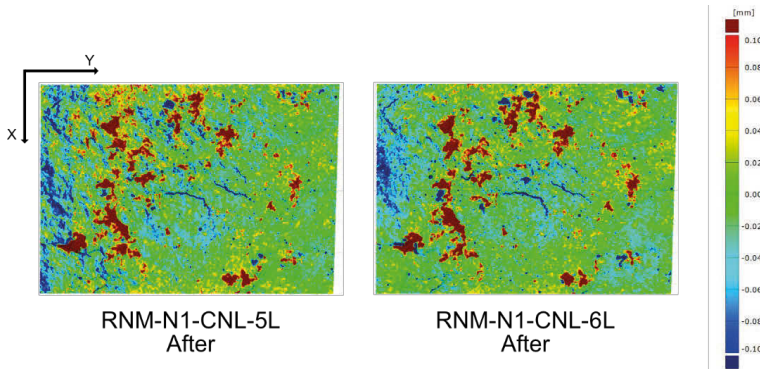


Figur 40. Morfologiska jämförelser mellan överdelarna RNM-N1-CNL-5U och RNM-N1-CNL-6U mot bergprovets överdel N1-CNL-U före skjuvtest.

Figure 40. Morphological comparisons between the upper parts RNM-N1-CNL-5U and RNM-N1-CNL-6U evaluated against the upper rock joint N1-CNL-U before shear test.

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

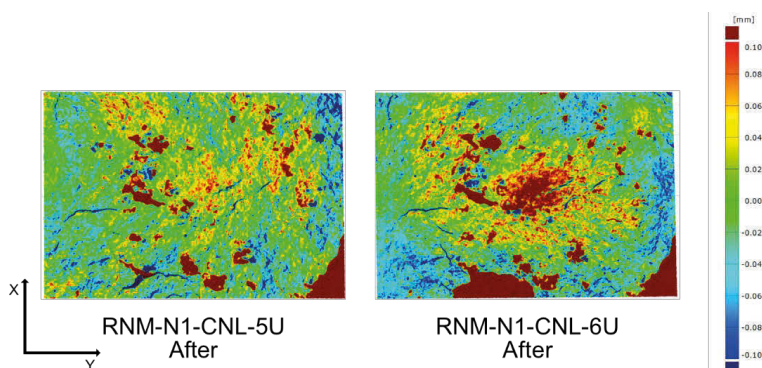
Motsvarande morfologiska ytjämförelser kan göras på ytorna efter skjuvtesterna (Figur 41 och Figur 42). Resultaten visar att skillnaderna i nötning mellan bergprovet N1-CNL och replikorna vida överstiger de morfologiska skillnaderna. Detta följer av att ytavvikelseerna efter skjuvtestet är betydligt större än före skjuvtestet, vilket följer av parvis jämförelse mellan Figur 39 och Figur 41 samt mellan Figur 40 och Figur 42. Om nötningen på bergprovet och replikorna varit lika stor skulle ytavvikelseerna före och efter provning varit identiska.



Figur 41. Morfologiska jämförelser mellan underdelarna RNM-N1-CNL-5L och RNM-N1-CNL-6L mot bergprovets underdel N1-CNL-L efter skjuvtest.

Figure 41. Morphological comparisons between the lower parts RNM-N1-CNL-5L and RNM-N1-CNL-6L evaluated against the lower rock joint N1-CNL-L after shear test.

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



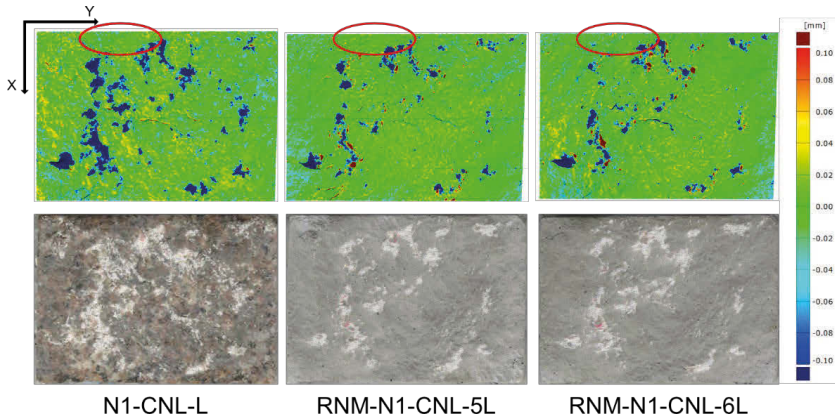
Figur 42. Morfologiska jämförelser mellan överdelarna RNM-N1-CNL-5U och RNM-N1-CNL-6U mot bergprovets överdel N1-CNL-U efter skjuvtest.

Figure 42. Morphological comparisons between the upper parts RNM-N1-CNL-5U and RNM-N1-CNL-6U evaluated against the upper rock joint N1-CNL-U after shear test.

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Skillnaderna i skjuvhållfasthetskaraktistiken mellan N1-CNL och replikorna måste alltså förklaras på annat sätt än genom hänvisning till avvikelser i geometrin. För att komma vidare i analysen jämförs därför under- och överdelarna inbördes före och efter skjuvtest (Figur 43 och Figur 44). Utöver parvis jämförelse mellan Figur 39 och Figur 41 samt mellan Figur 40 och Figur 42 framgår även från denna analys att nötningen för bergprovet N1-CNL var större än för replikorna. Från Figur 44 framgår att det nedre högra hörnet till N1-CNL-U flisats ut under skjuvtestet. Det är inte känt vid vilken tidpunkt urflisningen skedde och i motsvarande område på replikorna i Figur 44 framgår att detta område varit utsatt för nötning. Genom att i Figur 43 titta på motsvarande område för underdelarna, det vill säga det övre högra hörnet, framgår att nötningen varit likvärdig för alla tre proven och effekten av urflisningen av bergprovet får betraktas ha haft en marginell betydelse i skjuvhållfasthetskaraktistiken. Det visar sig också att området med den geometriska avvikelserna i underkanten av RNM-N1-CNL-6U, på grund av att en flaga lossnade från bergprovet vid tillverkningen av gjutformen, knappt var utsatt för nötning under skjuvtestet (det inringade området) vilket innebär att inverkan av denna skillnad mellan RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 får betraktas vara utan betydelse.

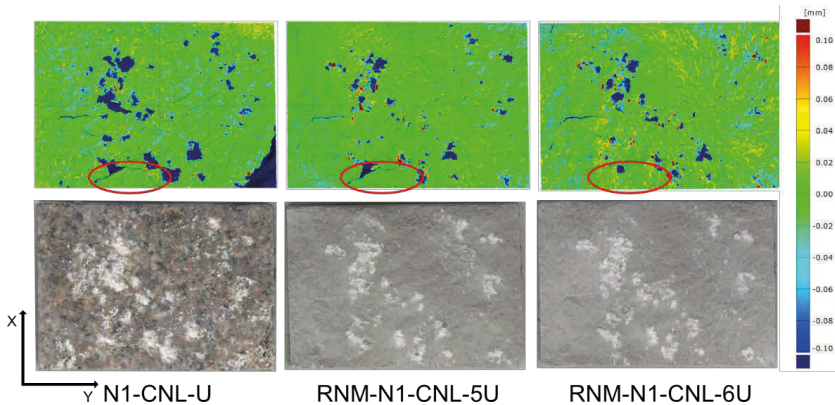
För att försöka finna en förklaring till skillnaden i skjuvhållfasthetskaraktistiken och till varför bergprovet nötts mer än replikorna, vilket konstaterats inte bero på skillnader i geometri, görs analyser med utgångspunkt från kontaktrycksmätningar och skanningdata kalibrerade mot dessa mätningar (Figur 45). Observationerna från de morfologiska jämförelserna före skjuvtesterna i Figur 39 och Figur 40 att avvikelserna mellan provkropparna är små avspeglas i likheten i uppmätta kontaktryck. Färgade områden utgör områden i kontakt. Grönt innebär ett kontaktryck under, rött inom och gult över tryckfilmens känslighetsområde.



Figur 43. Underdelarnas nötning efter skjuvtest framtagna genom jämförelser av skanningdata före och efter test (övre raden) och motsvarande foto av sprickytan efter test (undre raden).

Figure 43. The wear of the lower parts after shear testing derived through comparisons of scanning data before and after testing (upper row) and the corresponding photos of the crack surface after testing (the lower row).

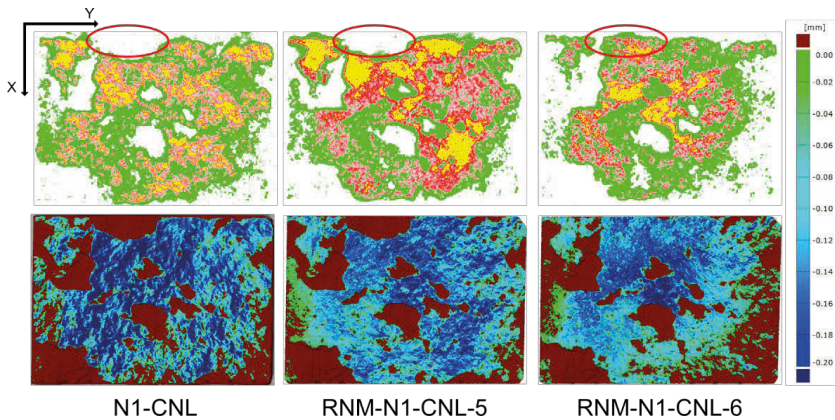
Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 44. Överdelarnas nötning efter skjuvtest framtagna genom jämförelser av skanningdata före och efter test (övre raden) och motsvarande foto av sprickytan efter test (undre raden).

Figure 44. The wear of the upper parts after shear testing derived through comparisons of scanning data before and after testing (upper row) and the corresponding photos of the crack surface after testing (the lower row).

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Figur 45. Uppmätta kontaktryck (övre raden) och motsvarande framtagna genom kalibrerad skanningdata (undre raden).

Figure 45. Measured contact pressures (upper row) and the corresponding derived through calibration of scanning data (the lower row).

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Inverkan av det höga området i RNM-N1-CNL-6U där urflisning skett syns tydligt genom att det finns ett kontaktryck i detta område, vilket inte är fallet för N1-CNL och RNM-N1-CNL-5U (området är inringat). Detta återspeglas i den ordning som gjutformarna tillverkats och till vilken replika de sedan använts enligt Tabell 1. Utöver detta område skiljer sig kontaktytorna något i det nedre högra hörnet mellan N1-CNL och RNM-N1-CNL-6, medan de i övrigt är att betrakta som mycket snarlika. Kontaktrycket enligt tunnfilmsmätningarna är dock högre i RNM-N1-CNL-5.

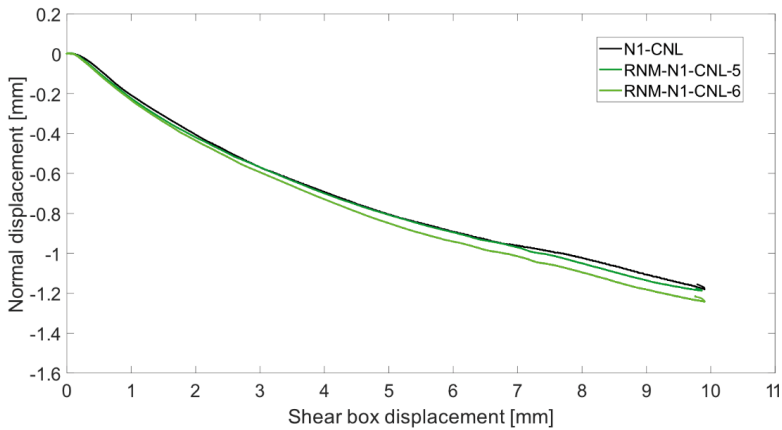
För kontaktytorna baserade på kalibrerad skanningdata indikerar gradvis mörkare blå färg ökande kontaktryck, vilket innebär att kontaktrycket enligt skanningdatan är högre för N1-CNL än för replikorna. Kontaktrycksmätningarna indikerar dock det omvända, även om skillnaderna mot RNM-N1-CNL-6 inte är lika självklara. Denna replika har dock en svag upphöjning på runt 0.15 mm centralt (Figur 40), vilket medför att trycket just i mitten blir högre och som en konsekvens kan tänkas innebära att trycket blir något lägre i övriga områden jämfört med för RNM-N1-CNL-5. Skillnaderna är väldigt små, men det är ändå denna skillnad som kan tänkas förklara de små skillnaderna i kontaktryck mellan replikorna. Mest relevant är därför att använda RNM-N1-CNL-5 i följande resonemang för att förklara skillnaderna mellan uppmätta och från skanningdata kalibrerade kontaktryck.

Skanningen utfördes innan kontaktrycksmätningarna och en tänkbar förklaring är att betongen till replikorna är hårdare (mer nötningsbeständig), vilket indikeras av att nötningen på replikorna var mindre än för bergprovet. Enligt detta resonemang kan en del asperiteter i bergprovet ha krossats i samband med kontaktrycksmätningarna, medan detta inte skett för betongen i replikorna. Detta förklarar i så fall det högre

uppmätta kontaktrycket i RNM-N1-CNL-5 jämfört med N1-CNL trots likartade kontaktytor. Eftersom skanningen utfördes före kontaktrycksmätningarna med den tryckkänsliga filmen innebär detta i så fall att den kalibrerade skanningdatan indikerar högre kontaktryck än vad som verkligen var fallet för N1-CNL.

Utifrån detta resonemang, som alltså ger en möjlig förklaring till skillnader i kontaktryck mellan skanningdata och kontaktrycksmätningar, bör den kalibrerade skanningdatan kunna betraktas som tillförlitlig, eftersom själva kontaktytan stämmer skanningdata och kontaktrycksmätningar. Baserat på det kalibrerade utgångsläget kan därför den inskannade överdelen förskjutas relativt underdelen enligt uppmätta skjuv- och normalförskjutningar för analys av kontaktytor vid godtyckligt skeende under skjuvtestet. Denna möjlighet kommer att användas i kommande analyser, men först följer en diskussion kring rotationens av överdelen relativt underdelen inverkan på skjuvhållfasthetskaraktistiken.

Två möjliga kvarstående förklaringar till de observerade skillnaderna i skjuvhållfasthetskaraktistiken mellan bergprovet och replikorna är skillnader i materialegenskaper eller i rotation under skjuvtestets gång (den övre provhållaren var sfäriskt lagrad). För att undersöka inverkan av rotationen kan relationen mellan normal- och skjuvförskjutningarna studeras. Graferna med medelvärdena av normalförskjutningarna registrerade av fyra LVDT följer varandra väl även om grafen för RNM-N1-CNL-5, som är den replika med minst geometrisk avvikelse följer grafen för N1-CNL bäst (Figur 46).

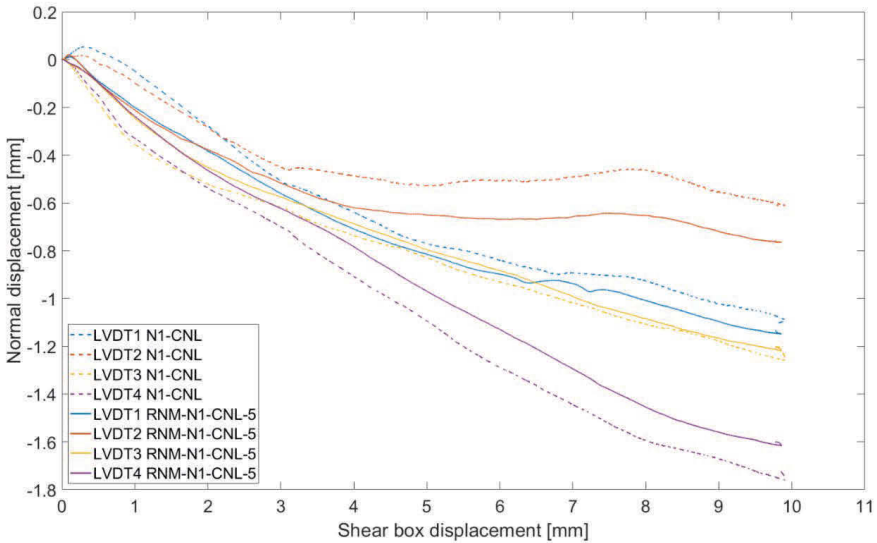


Figur 46. Medelvärden av normalförskjutningarna (negativa värden innebär dilatans) som funktion skjuvförskjutningarna.

Figure 46. Averages of the normal displacements (negative values imply dilatancy) over the shear displacements.

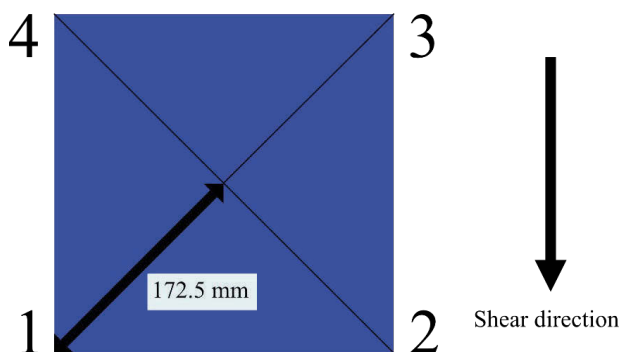
Skillnaderna i maximal skjuvspänning mellan N1-CNL och replikerna (Figur 20) återspeglas inte i graferna över normal- och skjuvförskjutningarna och särskilt är skillnaderna runt 0.5 mm skjuvförskjutning, då skjuvhållfastheten nådde sitt maximum, inte särskiljbara på skalan över skillnaderna i normalförskjutningarna sett över hela testet.

För att förfina analysen studeras därför de fyra individuella lägesgivarnas normalförskjutningar. Figur 47 visar resultaten för N1-CNL och RNM-N1-CNL-5. RNM-N1-CNL-6 har utelämnats för att figuren skall bli läsbar. Lägesgivarnas position relativt skjuvriktningen framgår av Figur 48. Skjuvriktningen indikerar underdelens rörelseriktning relativt den i horisontalplanet mot translation (rörelse) fixerade, men sfäriskt lagrade överdelen.



Figur 47. Normalförskjutningarna för de enskilda lägesgivarna (negativa värden innebär dilatans) som funktion skjuvförskjutningarna.
Figure 47. Normal displacements for the individual displacement transducers (negative values imply dilatancy) over the shear displacements.

Vid maximal skjuvspänning, runt 0.5 mm enligt Figur 20, framgår att bakkanten på N1-CNL lyfts i förhållande till framkanten, medan RNM-N1-CNL-5 dilaterat jämnt. I Tabell 4 finns för bergprovet, RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 de individuella värdena för normalförskjutningarna vid maximal skjuvspänning redovisade tillsammans med medelvärdena och respektive skjuvförskjutningar. Från tabellen framgår att även RNM-N1-CNL-6 lyfts i bakkant, men inte lika mycket som N1-CNL sett i relation till de båda främre lägesgivarna.



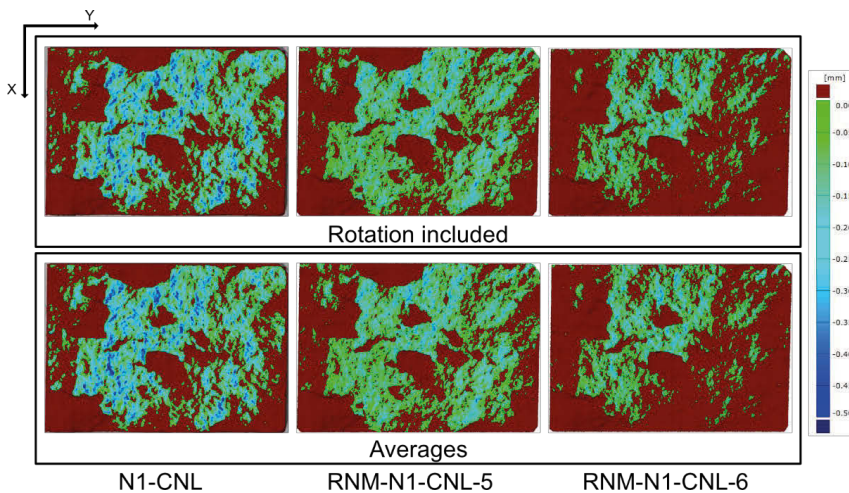
Figur 48. Lägesgivarnas för normalförskjutningar numrering och inbördes position. Skjuvriktning indikerar underdelens rörelseriktning relativt den fixa överdelen.
Figure 48. The numbering and relative position of the normal displacement transducers. The shear direction indicated the moving direction of the lower part in relation to the fixed upper part.

Tabell 4. Lägesgivarnas individuella värden och medelvärden för normalförskjutningen och skjuvförskjutningen vid maximal skjuvspänning.
Table 4. The individual values and averages of the normal displacement transducers and the shear displacement at peak shear stress.

Designation	Normal displacement [mm]					Average	Shear displacement [mm]
	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	Average		
N1-CNL	0.052	0.011	-0.130	-0.109	-0.044	0.37	
RNM-N1-CNL-5	-0.062	-0.065	-0.073	-0.072	-0.068	0.40	
RNM-N1-CNL-6	-0.078	-0.098	-0.161	-0.146	-0.121	0.56	

För att undersöka den eventuella inverkan som dessa skillnader i rotation kan tänkas ha på skjuvhållfasthetskaraktistiken tas hjälp av skanningdata som kalibrerats mot uppmätta kontaktryck. I Figur 49 visar den övre raden kontaktytorna då hänsyn tagits till den faktiska rotation av överdelen som ägt rum utifrån de individuella lägesgivarnas registrerade normalförskjutningar vid maximal skjuvspänning. Detta åstadkoms genom att förflytta (hänsyn tas till både dilatans och rotation) skanningdatan för överdelen relativt skanningdatan för underdelen motsvarande i skjuvtesterna uppmätta individuella värden för de fyra lägesgivarna. Den undre raden visar kontaktytorna baserat på lägesgivarnas medelvärden (hänsyn tas endast till dilatans). Vid en noggrann parvis jämförelse mellan bilderna i den övre och den undre raden kan ytterst små skillnader i kontaktyta urskiljas. Det kan utslutas att dessa skillnader i rotation har någon inverkan på skillnaderna i skjuvhållfasthetskaraktistiken. Detta inses genom att först jämföra kontaktytorna för N1-CNL med RNM-N1-CNL-5 då givarnas medelvärden använts.

Här framgår att det finns vissa skillnader i kontaktyta. Genom att därefter parvis jämföra kontaktytorna där givarnas medelvärden använts med kontaktytorna där hänsyn tagits till rotation, kan det konstateras att det inte är de marginella skillnaderna i kontaktyta på grund av rotation i förhållande till de geometriska skillnaderna som ger upphov till skillnaderna i skjuvhållfasthet. Denna slutsats stärks ytterligare genom att jämföra skillnaderna i kontaktryck mellan RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 där det framgår att dessa är betydligt större än skillnaderna mellan N1-CNL med RNM-N1-CNL-5 samtidigt som skillnaderna skjuvhållfasthetskaraktistik mellan replikerna trots detta är små. Inverkan som rotationen har på skillnaderna i kontaktytorna mellan RNM-N1-CNL-5 och RNM-N1-CNL-6 är slutligen försumbar jämfört med skillnaderna i kontaktyta baserat på medelvärdena.



Figur 49. Kontaktytor vid maximal skjuvspänning baserat lägesgivarnas för normalförskjutningarna individuella värden (övre raden) respektive medelvärden (nedre raden).

Figure 49. Contact areas at peak shear stress based on the individual reading of the normal displacement LVDT:s (upper row) and averages (lower row), respectively.

Larsson et al. 2023b, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

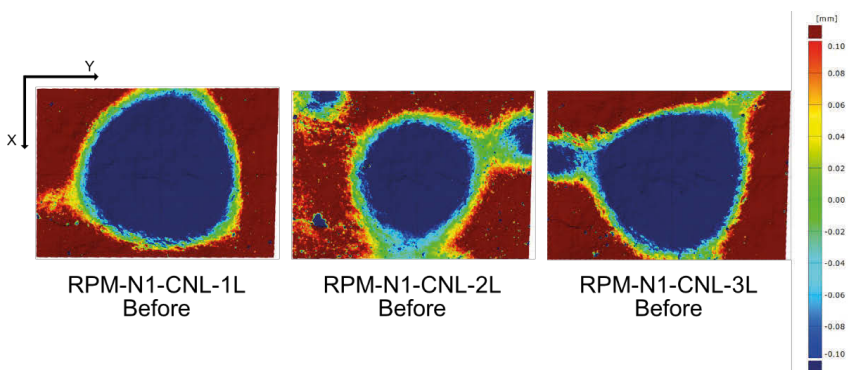
Ovanstående resonemang slår fast att det varken är skillnader i geometri, eftersom sprickytorna både morfologiskt och aperturfördelningsmässigt överensstämmer, eller i rotation som ger upphov till skillnader i skjuvhållfasthet mellan bergprov och replikerna. Slutsatsen är därför att den observerade skillnaden i skjuvhållfasthetskaraktistik sannolikt grundar sig på skillnader i materialegenskaper mellan berg och betong.

I så fall är en tänkbar förklaring till den från både foton och skanningdata observerade större nötningen för bergprovet (Figur 43 och Figur 44), att det högre skjuvspänningsmaximat för bergprovet jämfört med replikornas förklaras genom en högre energiåtgång kopplad till ökad nötning. Skillnaderna i materialegenskaperna är mer specifikt då kopplade till nötningmotståndet.

Dock bör det även poängteras att inverkan från skillnaden i apertur, eller passning, kvantitativt utöver medelvärde och standardavvikelse inte undersöks inom ramen för denna analys, och att denna parameter därför behöver tas i beaktande även i fortsatt analysarbete syftandes till att förklara de uppmätta skillnaderna.

4.5 Kompletterande analys på replikor med perfekt passade sprickor

Som en avslutande analys i diskussionen kring kopplingen i utfall från direkta skjuvtester mellan bergprov och replikor presenteras här resultaten från tre replikor tillverkade med perfekt passning: RPM-N1-CNL-1, RPM-N1-CNL-2 och RPM-N1-CNL-3. Som beskrivits i avsnitt 3.1 innebär perfekt passning att underdelen av replikan tillverkades från en gjutform av bergprovets underdel. Replikatets överdel gjöts därefter av direkt från underdelen. De perfekt passade replikornas underdelar tillverkades efter samma principer som de naturligt passade replikorna och därför erhöles även för dessa fall morfologiska avvikelser relativt bergprovets underdel vilket tidigare visats i Figur 23.

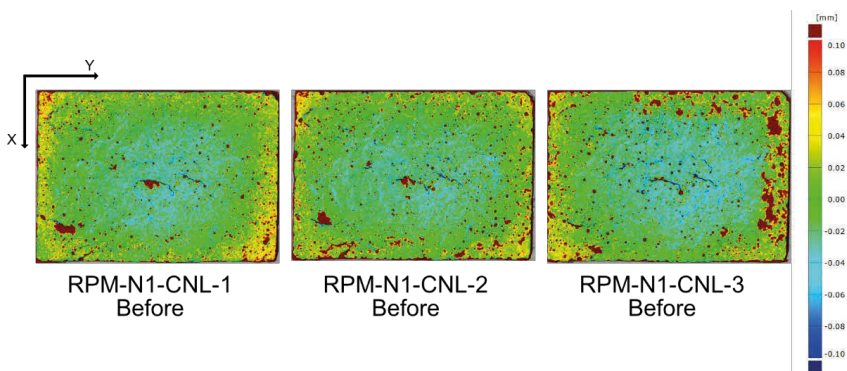


Figur 50. Morfologiska jämförelser mellan underdelarna RPM-N1-CNL-1L, RPM-N1-CNL-2L och RPM-N1-CNL-3L mot bergprovets underdel N1-CNL-L före skjuvtest.
Figure 50. Morphological comparisons between the lower parts RPM-N1-CNL-1L, RPM-N1-CNL-2L and RPM-N1-CNL-3L evaluated against the lower rock joint N1-CNL-L before shear test.

Figur 50 visar samma avvikelser men i en högre upplösning och det framgår att geometrin varierar inbördes mellan underdelarna till replikorna, men framför allt att de

avviker markant från bergprovets underdel i det att replikorna har en djup svacka i mitten (upp till 0.9 mm) och förhöjda områden runt svackan (upp till 0.5 mm).

Överdelarna gjöts av direkt från underdelarna och Figur 51 visar de morfologiska skillnaderna mellan under- och överdelarna (inpassning gjord med avseende på sprickytorna). Dessa utvärderingar kommer sedan att användas i tolkningen av passningen då delarna är uppriktade efter toppytan på provhållaren (inpassning gjord enligt Figur 29). Rött indikerar som tidigare de områden där överdelen ligger högre än underdelen. De punktformiga röda områdena utgör porer i överdelen. De mer utbredda röda områdena utgör områden som släppt från underytan i samband med avformning efter gjutning. Förutom dessa områden avviker inte ytorna mer än några hundradels millimeter. I likhet med RNM utfördes skanningen efter det att båda replikahalvorna tillverkats. RPM har alltså underdelar som morfologiskt tydligt avviker från bergprovet, men de har samtidigt en jämn och bra passning.

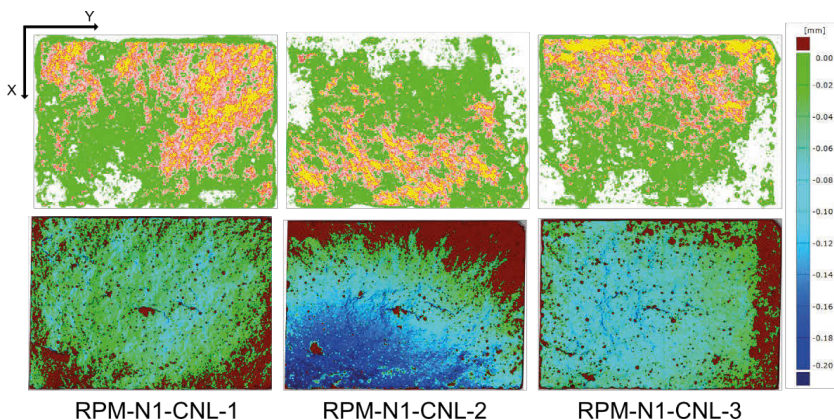


Figur 51. Morfologiska jämförelser mellan under- och överdelarna före skjuvtest för RPM som visar avvikelserna gentemot en perfekt avgjuten underdel.

Figure 51. Morphological comparisons between the lower and the upper parts of RPM which shows the deviations from a perfectly replicated lower part.

Figur 52 visar uppmätta kontaktytor och motsvarande framtagna genom skanningdata kalibrerad genom att i normalbelastningsriktningen translatera ytorna tills att en så god överensstämmelse gentemot uppmätta kontaktytor som möjligt erhöles. De uppmätta kontaktytorna är som helhet likartade för alla tre provkropparna, vilket även de morfologiska avvikelserna i Figur 51 indikerar. Motiveringen till detta påstående är som följer. Att fördelningarna av uppmätta kontaktytor inom provkropparna skiljer sig åt kan bero på sättningar och skillnader i dessa under normalbelastningstesterna och även inverkan från skillnader i position av gjutformen relativt provhållaren i samband med ingjutning. Att det funnits skillnader i position relativt provhållaren indikeras av att uppmätta kontaktytor skiljer sig från motsvarande framtagna genom kalibrerad skanningdata, som är stelt uppriktad i förhållande till toppytan till provhållaren och därför inte fångar upp eventuell rotation överdelen i samband med kontakt mellan

under- och överdelarna. Skillnaderna mellan uppmätta kontaktytor och kalibrerade från skanningdata framgår särskilt för RPM-N1-CNL-2. Det skall dock hållas i minnet, att med tanke på hur jämnt fördelade kontaktytorna enligt Figur 51 är och i förhållande till bergprovet och RNM, så är det ytterst små snedställningar som krävs för att ge utslag på fördelningen av kontaktytorna.

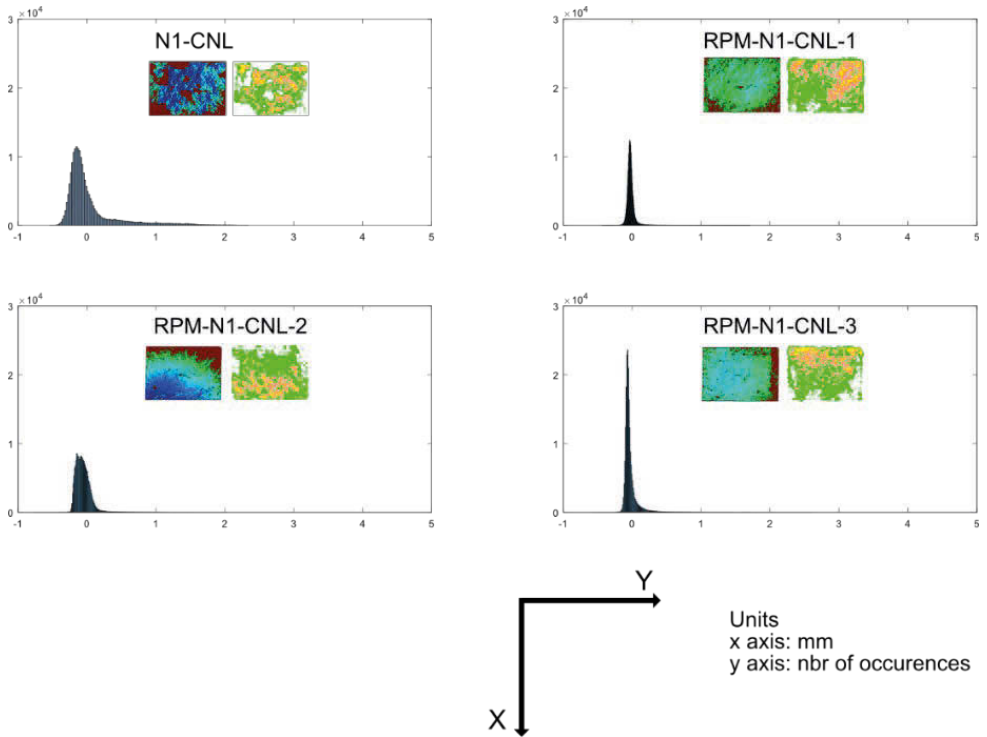


Figur 52. Uppmätta kontaktryck (övre raden) och motsvarande framtagna genom kalibrerad skanningdata (undre raden).

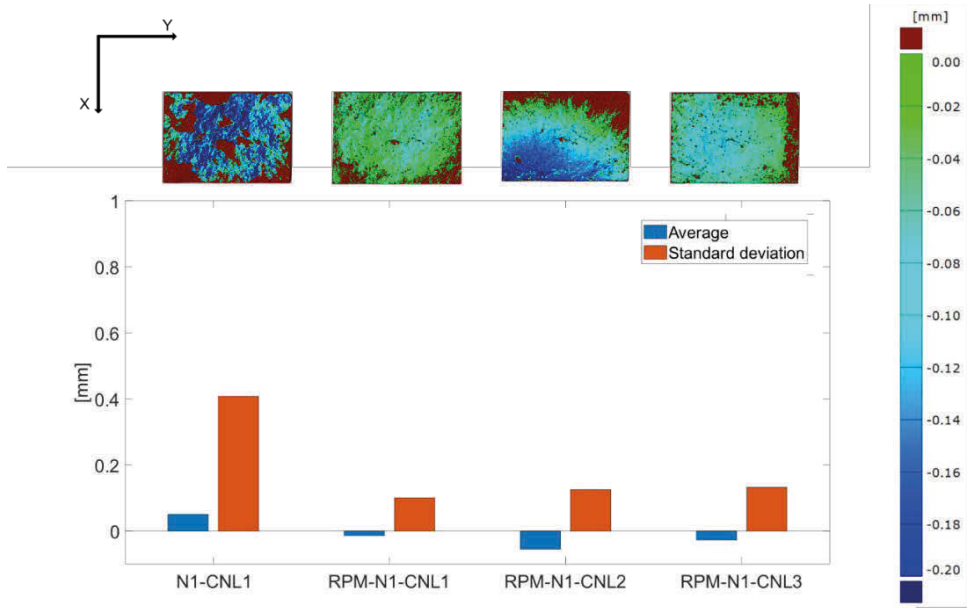
Figure 52. Measured contact pressures (upper row) and the corresponding derived through calibration of scanning data (the lower row).

Framtagna på samma sätt som för RNM visas i Figur 53 aperturfördelningarna för RPM. Jämfört med bergprovet N1-CNL är spridningen i aperturfördelningen mindre och medelvärdena lägre för RPM, vilket är förväntat med tanke på att de är tillverkade för att ge en så bra passning mellan under- och överdelar som möjligt.

Aperturfördelningarna för RPM-N1-CNL-1 och RPM-N1-CNL-3 är snarlika, vilket överensstämmer med det visuella intrycket från uppmätta kontaktytor. Detta är inte fallet för RPM-N1-CNL-2 och en tänkbar anledning till detta har just diskuterats i det föregående. En sammanställning av standardavvikelser och medelvärden tillsammans med miniatyrer av kalibrerade kontaktytor presenteras i Figur 54. Även om den kalibrerade skanningdatan för RPM-N1-CNL-2 är behäftad med en synbar avvikelse gentemot uppmätt kontaktyta är både medelvärden och standardavvikelser för aperturen betydligt lägre för RPM som grupp jämfört med motsvarande värden för RNM (Figur 38).



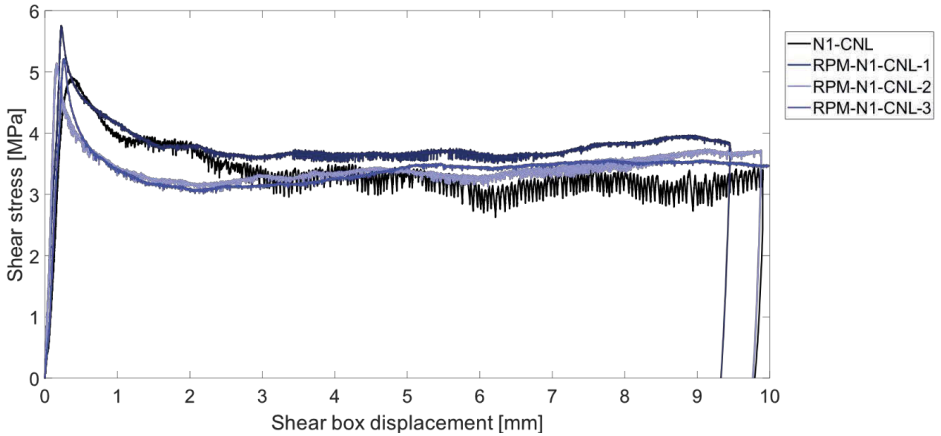
Figur 53. Aperturfördelningar beräknade på skanningdata (miniatyrerna till vänster) som kalibrerats mot uppmätta kontakttryck (miniatyrerna till höger).
Figure 53. Aperture distributions calculated from scanning data (the miniatures to the left) which have been calibrated against contact pressure measurements (the miniatures to the right).



Figur 54. Medelvärden och standardavvikelser för aperturfördelningarna beräknade från kalibrerad skanningdata

Figure 54. Averages and standard deviations related to the aperture distributions calculated from calibrated scanning data.

Figur 55 visar skjuvhållfasthetskaraktistiken i förhållande till bergprovet N1-CNL. Det framgår att skjuvstyvheten är något högre för de perfekt passade replikerna jämfört med bergprovet och att replikerna har en högre maximal skjuvspänning och en mer definierad topp. Den för RNM tidigare observerade trenden mellan lägre medelvärde och lägre standardavvikelser för aperturerna och högre skjuvhållfasthet (genom jämförelse mellan Figur 20 och Figur 38) kan även utvidgas till att gälla för RPM som grupp i förhållande till RNM. Inom RPM som grupp är dock både nivåerna och spridningen på medelvärden och standardavvikelser små. Oavsett felet som introduceras när skanningdatan kalibreras mot uppmätta kontaktytor och vilka medelvärden och standardavvikelser för RPM som är sanna, så indikerar både den likartade morfologiska passningen mellan under- och överdelar för alla RPM (Figur 51) och de likartade uppmätta kontaktrycken (Figur 52) att även aperturfördelningen mellan RPM är likartad. Förklaringen till skillnaderna i skjuvhållfasthetskaraktistiken därför får sökas på annat håll.

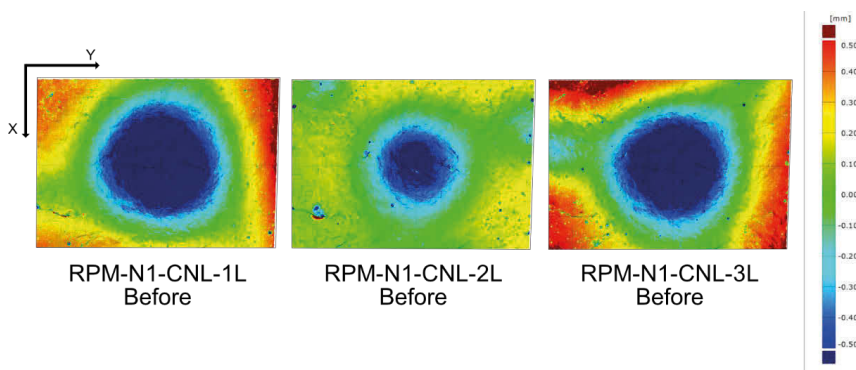


Figur 55. Skjuvspänning som funktion av skjuvförskjutning för bergprovet N1-CNL tillsammans med motsvarande replikor med perfekt passning (RPM).
Figure 55. Shear stress over shear displacement for the rock joint N1-CNL along the corresponding replicas with perfect match (RPM).

Från Figur 56 (även visade i Figur 23 i annan storlek och Figur 50 i annan skala) framgår att utöver att underdelarna för replikorna till RPM skiljer sig gentemot bergprovet så skiljer sig även underdelarna sinsemellan. Extremvärdena för avvikelserna gentemot bergprovet är i tur och ordning för RPM-CNL-N1-1, RPM-CNL-N1-2 och RPM-CNL-N1-3: [-0.9, 0.5], [-0.6, 0.2] och [-0.9, 0.5] där det lägsta värdet återfinns i centrum av provet mitt i svackan och de högsta värdena längs kanterna. Eftersom de morfologiska skillnaderna mellan under- och överdelarna är små är det tänkbart att den på ytråheten överlagrade vågigheten som de centrala svackorna och de höga kanterna utgör har en inverkan på skjuvhållfasthetskaraktistiken.

Under antagandet att den överlagrade vågformen har betydelse för skjuvhållfasthetskaraktistiken skulle det i så fall innebära att RPM-N1-CNL-2 har lägst maximal skjuvspänning genom att denna provkropp har den mest flacka vågformen (minst differens mellan extremvärdena), vilket också kan observeras i Figur 55. Både RPM-N1-CNL-1 och RPM-N1-CNL-3 har samma differens mellan extremvärdena och differensen är större än den för RPM-N1-CNL-2. Detta skulle i så fall innebära att både RPM-N1-CNL-1 och RPM-N1-CNL-3 skulle ha högre skjuvhållfasthet, vilket även kan observeras i uppmätt skjuvhållfasthet. Det är dock med liten marginal som skjuvhållfastheten för RPM-N1-CNL-3 är högre än för RPM-N1-CNL-2. Däremot är skjuvhållfastheten betydligt högre för RPM-N1-CNL-1 jämfört med RPM-N1-CNL-3 trots samma differens mellan extremvärdena. Med beaktande av att underdelen rörde sig i positiv skjuvriktning medan överdelen var fixerad skulle en förklaring med referens till Figur 56 kunna vara kopplad till att lutningen på området i de vänstra hörnen är högre i RPM-N1-CNL-3 jämfört med RPM-N1-CNL-1. Under

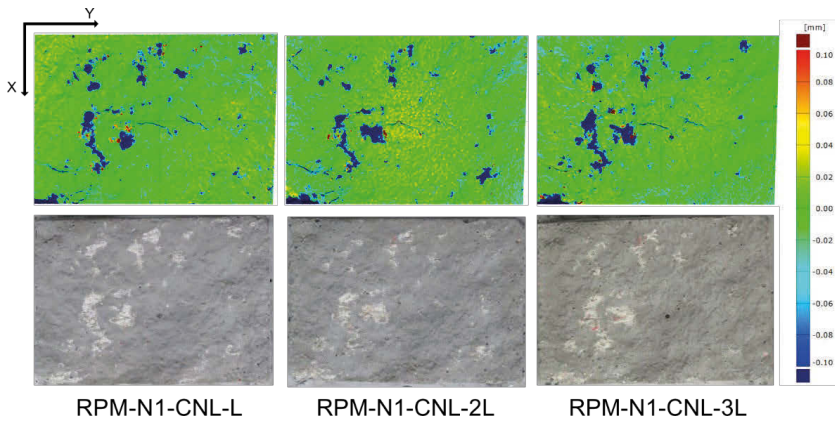
skjuvning innebär detta att den brantare lutningen mellan området i hörnen och områdena som omger svackan i RPM-N1-CNL-3 reducerar kontaktytan jämfört med fallet då områdena runt svackan är mer jämnt fördelade, som i fallet för vänstersidan av RPM-N1-CNL-1. En reducerad kontaktyta, förutsatt att morfologin mellan provkropparna är likartad, innebär i sin tur en ett minskad skjuvkraft. Detta skulle kunna förklara den lägre maximala skjuvspänningen för RPM-N1-CNL-3 jämfört med RPM-N1-CNL-1.



Figur 56. Morfologiska jämförelser mellan underdelarna RPM-N1-CNL-1L, RPM-N1-CNL-2L och RPM-N1-CNL-3L mot bergprovets underdel N1-CNL-L före skjuvtest (annan skala än i Figur 50).

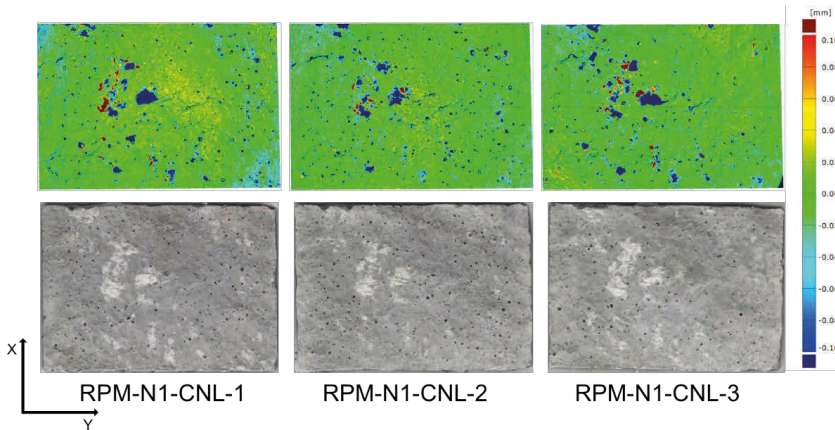
Figure 56. Morphological comparisons between the lower parts RPM-N1-CNL-1L, RPM-N1-CNL-2L and RPM-N1-CNL-3L evaluated against the lower rock joint N1-CNL-L before shear test (the scale differs from Figure 50).

Figur 57 och Figur 58 visar nötningen för under- respektive överdelarna både utvärderad genom skanningdata och från foton. Skillnaderna är små, men nötningen är störst för RPM-N1-CNL-1 följd av RPM-N1-CNL-3 och RPM-N1-CNL-2. Detta framgår tydligast från foton. Dessa skillnader kan observeras trots att provkropparnas under- och överdelar morfologiskt är väl passade. Det kan även noteras att RPM-N1-CNL-1 har nötta områden på högersidan vilket inte RPM-N1-CNL-3 har i samma utsträckning, vilket stöder resonemanget i föregående stycke.



Figur 57. Underdelarnas nötning efter skjuvtest för RPM framtagna genom jämförelser av skanningdata före och efter test (övre raden) och motsvarande foto av sprickytan efter test (undre raden).

Figure 57. The wear of the lower parts after shear testing for RPM derived through comparisons of scanning data before and after testing (upper row) and the corresponding photos of the crack surface after testing (the lower row).



Figur 58. Överdelarnas nötning efter skjuvtest för RPM framtagna genom jämförelser av skanningdata före och efter test (övre raden) och motsvarande foto av sprickytan efter test (undre raden).

Figure 58. The wear of the upper parts after shear testing for RPM derived through comparisons of scanning data before and after testing (upper row) and the corresponding photos of the crack surface after testing (the lower row).

Det går alltså att föreställa sig två olika sprickor där båda har samma passning och därmed samma aperturfördelning. Den ena sprickan är dock plan med småknottriga

upphöjningar (de är dessa som utgör aperturfördelningen). Den andra sprickan har likadana småknottriga upphöjningar, men den är inte plan. Den är till exempel istället skålförmad. Båda sprickorna har alltså samma aperturfördelning, men den skålförmade sprickan kommer enligt resonemanget ovan att uppvisa en högre skjuvhållfasthet. Detta beror på att utöver ytråheten, vilken avspeglas av aperturfördelningen, så spelar även den på ytråheten överlagrade (våg)formen roll för skjuvhållfastheten.

5. DISKUSSION

Arbetet som redovisats i denna rapport ingår i den inledande licentiatetappen av doktorsarbetet och består av två delar. Den första delen består av framtagandet av en skjuvtestutrustning för provstorlekar i kombination med spänningar som hittills inte varit möjliga att studera. Den andra delen omfattar en utvärdering av hur väl replikor representerar bergsprickor genom jämförelser mellan resultat från skjuvtester på bergprov och motsvarande replika. Detta resulterade i framtagandet av parametrar för geometrisk kvalitetssäkring av replikor. Bestämning av dessa parametrar kan användas före skjuvtester för att kunna dra korrekta slutsatser hur väl replikorna kommer att representera verkliga bergsprickor, samt vilka osäkerheter replikorna är behäftade med då parameterstudier med flera replikor genomförs.

En 16 ton tung utrustning avsedd att användas för direkta skjuvtester med provstorlekar upp till 600 x 400 mm under maximalt 5 MN i både skjuv- och normalriktningen har konstruerats, tillverkats och satts i drift genom tester där ett stålprov använts för att verifiera funktionalitet, både mekaniskt och reglertekniskt. Specifikt har testsystemets normalstyvhet mätts upp då det är av vikt att känna till denna för att kunna kompensera för de för höga normaldeformationer som registreras då inget testsystem är oändligt styvt. Även om testsystemets uppmätta normalstyvhet är hög, 11 326 kN/mm utvärderad som sekantmodulen i intervallet 750 – 4 200 kN, så resulterar detta i en normaldeformation runt 0.6 mm vid 4 200 kN. Denna normaldeformation ger för test med randvillkoret konstant normalstyvhet upphov till att för låga normallaster läggs på. För att kompensera för detta har därför ett tillvägagångssätt tagits fram där en effektiv normalstyvhet läggs på istället för den avsiktliga normalstyvheten. Det visar sig att utan att kompensera för testsystemets normalstyvhet så erhålls ett fel i normallast på 9.4 % vid belastning upp till 28 MPa (4 200 kN) med en avsiktlig normalstyvhet på 10.0 MPa/mm (1 500 kN/mm). Genom att istället använda den effektiva systemnormalstyvheten 11.53 MPa/mm (1 729 kN/mm) som ingångsvärde i styrsystemet kan felet reduceras till 1.4 %.

För geometrisk kvalitetssäkring av replikor studerades två typer av parametrar. Den första parametern beskriver sprickyornas morfologiska avvikelser, alltså avvikelser kopplade till formen. Det visade sig att standardavvikelsen för avvikelserna i normalbelastningsriktningen mellan skanningpunkterna, σ_{mf} , korrelerar väl med det visuella intrycket av avvikelser framtagna genom jämförelser av skanningdata mellan bergprovets sprickytor och replikornas, och σ_{mf} bör vara < 0.06 mm för skanning utförd med ett genomsnittligt punktavstånd (upplösning) på 0.2 mm.

Den andra parametern som studerades är kopplad till sprickyornas läge relativt provhållaren. Detta eftersom en replika som är morfologiskt överensstämmande med bergprovets sprickyta skulle kunna ligga i ett avvikande läge relativt provhållaren, vilket i sin tur skulle kunna påverka kontaktytorna och därmed skjuvhållfasthetskaraktistiken. För att analysera denna typ av avvikelser projicerades

normalvektorerna till replikaytornas bäst anpassade plan på sprickytnans bäst anpassade plan för bergprovet och betecknas här V_{Hp100} . På så sätt erhålls information om både avvikelsernas storlek och riktning. Avvikelserna uttryckta som en vinkel visade sig vara i storleksordningen tiondels grader, $[0.02^\circ, 0.21^\circ]$, men tydligt synbara vid jämförelser baserade på skanningdata. Utifrån tillgängliga data går det inte att förutsäga vilken inverkan en avvikelse på maximalt beräknade 0.21° skulle ha på marginalen. Antagandet baserat på de tillgängliga resultaten är därför att skillnaderna i läget relativt provhållaren inte har någon avgörande betydelse för skjuvhållfasthetskaraktistiken så länge avvikelserna ligger inom det beräknade intervallet motsvarande $|V_{Hp100}| = 0.35\text{mm}$. Det skall noteras att testerna i denna studie utfördes med en sfärsikt lagrad överdel. Detta innebär att överdelen var fri att rotera kring sin centrumpunkt och kunde därigenom rikta in sig efter underdelens läge i samband med att normalspänningen lades på. Av de båda föreslagna kvalitetssäkringsparametrarna är σ_{mf} mest signifikant för utfallet från skjuvtesterna. För tester där överdelen är förhindrad från att rotera, eller för replikor tillverkade med en annan metod än den som presenterats i detta arbete, kan denna bedömning behöva omprövas.

För att de båda föreslagna kvalitetssäkringsparametrarna skall vara relevanta för utfallet från direkta skjuvtester krävs att det går att visa på kopplingen mellan dessa och utfallet från skjuvtesterna. Eftersom båda kvalitetsäkringsparametrarna grundar sig på utvärderingar av avståndet i normalbeslastningsriktningen mellan varje skanningpunkt på bergets sprickyta och replikatets, så är de genom detta också indirekt kopplade till aperturfördelningen. Denna koppling består av att aperturfördelningen i sin tur utgörs av avstånden mellan en provkroppens under- och överdelar för varje skanningpunkt. Slutligen kunde kvalitetssäkringsparametrarnas relevans för utfallet från direkta skjuvtester fastställas genom att skillnaderna i aperturfördelning uttryckt i medelvärden och standardavvikelser mellan bergprovet och replikorna stämmer väl överens med skillnaderna i skjuvhållfasthetskaraktistisk. Dock har inverkan från skillnaden i apertur, även om den är liten, kvantitativt inte fullt ut undersöks inom ramen för denna analys och denna parameter behöver därför tas i beaktande även i fortsatt analysarbete med syftet att förklara de uppmätta skillnaderna.

Det visade sig också att även de av replikorna som geometriskt stämde väl överens med bergprovet förvisso hade ungefär samma residualskjuvhållfasthet och skjuvstyvhet som bergprovet och att skjuvhållfasthetsmaximum nåddes vid ungefär samma skjuvförskjutning, men att skjuvhållfasthetsmaximum var tydligt lägre, cirka 4 MPa för replikorna jämfört med cirka 5 MPa för bergprovet. Genom analys av skanningdata kunde det fastslås att dessa skillnader inte kan förklaras genom geometriska avvikelser eller genom skillnader i rotation av provkroppens överdel under skjuvtestet. Det kunde däremot fastslås att det finns en större nötning i bergprovet än i replikorna, vilket indikerar att skillnaderna i maximal skjuvhållfasthet troligtvis är relaterade till skillnader i materialegenskaper. Den höghållfasta betongen som replikorna tillverkats av har uppenbarligen ett högre nötningsmotstånd än bergprovet av granit trots att replikornas hållfasthet är lägre (replikor: drag 8.9 MPa, kompression 197.6 MPa,

elasticitetsmodul 63.8 GPa; granit: drag 10.7 MPa, kompression 267.9 MPa, elasticitetsmodul 72.9 GPa). Hållfastheten är framtagen på bulkmaterialet, vilket kan innebära att värdena inte är representativa för själva sprickan. Det kan också innebära att varken hållfastheten i drag eller kompression, eller elasticitetsmodulen är relevanta för en sprickas skjvuhållfasthet. En tänkbar förklaring skulle kunna vara att skillnaden i maximal skjvuhållfasthet istället är kopplad till skillnader i energiåtgång vid nötning. Materialvetenskapligt skulle skillnaderna kunna förklaras med att graniten har en kornstruktur uppbyggd av olika mineraler, medan den höghållfasta betongen är uppbyggd av ballastkorn fördelade i cement. Dessa skillnader skulle kunna fångas upp av någon form av kvasi-statiskt slagseghetstest. Vidare utredning av denna frågeställning ligger dock utanför detta arbetes omfattning.

Replikor tillverkade med perfekt passning, det vill säga att replikornas underdelar gjutits av från bergets, och att överdelarna därefter tillverkats genom direktavgjutning från underdelarna analyserades också. Dessa replikor hade en högre skjvustyvhet, högre maximal skjvuspänning och en skarpare topp vid maximal skjvuspänning än bergprovet. Detta beror på att sprickorna med perfekt passning är att betrakta som en helt annan spricka än bergprovets. Med tanke på att replikornas sprickytor var väl inpassade har deras aperturfördelningar både lägre medelvärden och standardavvikelser jämfört med bergprovet (Figur 54). Trots att alla replikor tillverkade med perfekt passning hade likvärdiga passningar mellan under- och överdelar och likvärdiga uppmätta kontakttryck, uppvisade dessa prov skillnader i maximal skjvuhållfasthet. Förklaringen till detta föreslås bero på att de olika replikornas underdelar skiljde sig formmässigt åt sinsemellan. Dessa formavvikelser utgjorde en på ytråheten överlagrad vågform som eventuellt kan korreleras till skillnaderna i skjvuhållfasthet. Detta kan vara en indikation på att kriterier för prediktion av skjvuhållfastheten inte bara behöver ta hänsyn till ytråheten och aperturfördelningen, utan även till överlagrade vågformer.

Avvikelsen för det ena av de båda bästa replikorna av typen RNM låg inom några hundradels millimeter, medan avvikelserna för den andra av replikorna lokalt låg upp runt 0.15 mm (Figur 39 och Figur 40). Skjvuhållfasthetskaraktistiken för dessa båda replikor är trots detta mycket snarlik. Detta indikerar att känsligheten för att geometriska avvikelser hos replikorna inte skall återspeglas i skjvuhållfasthetskaraktistiken inte är större än att avvikelserna kan hållas inom föreslagna gränser med den beskrivna tillverkningsprocessen.

Även om de båda replikorna som uppfyller de föreslagna gränsvärdena för σ_{mf} och V_{Hp100} som tidigare nämnts beskriver bergprovets skjvuhållfasthetskaraktistisk, så kan de inte fullt ut kan återskapa en bergsprickas beteende, eftersom replikornas skjvuspänningsmaximum är lägre. Replikorna kan dock användas i fenomenologiska analyser där inverkan från enskilda parametrar studeras. Detta kan användas som grund i utvecklingen av skjvuhållfasthetskriterier genom att använda ingångsparametrarna för replikorna till kriteriet ifråga. Vid valideringen av skjvuhållfasthetskriteriet tas därefter

ingångsparametrarna fram för bergprovet och de genom kriteriet predikterade värdena jämförs med utfallet från skjuvtestet.

6. SLUTSATSER

En unik utrustning avsedd för direkta skjuvtester på provstorlekar upp till 600 x 400 mm under maximalt 5 MN i både skjuv- och normalriktningen har framgångsrikt tagits i drift. Ett tillvägagångssätt har tagits fram som kompenserar för att för låga normallaster läggs på under tester med konstant normalstyvhet, som en effekt av att teststystemets normalstyvhet inte är oändlig. Vid 4.2 MN normallast kunde felet reduceras från 9.4 % till 1.4 %.

Utifrån skanningdata kunde ett antal felkällor i tillverkningen av replikor identifieras: porer, positioneringsproblem av gjutformarna och att flagor lossnade från bergprovets sprickyta i samband med tillverkningen av gjutformarna. Det visas att dessa felkällor kunde elimineras genom justering av tillverkningsprocessen.

Två parametrar för geometrisk kvalitetssäkring av replikor tillsammans med föreslagna gränsvärden har presenterats. Den första parametern reflekterar de morfologiska avvikelserna och utgörs av standardavvikelsen för avvikelserna i normalbelastningsriktningen mellan skanningpunkterna på replikan och bergprovet. Parametern betecknas σ_{mf} och föreslås vara ≤ 0.06 mm för godkänd replika. Den andra parametern beskriver skillnaderna i orienteringen av sprickytan i förhållande till provhållaren och betecknas V_{Hp100} . Denna parameter utgörs av en vektor projicerad på bergprovets sprickytor och beskriver replikornas avvikelser både med avseende på storlek och riktning. Baserat på resultaten tillgängliga från denna studie är rekommendationen att $|V_{Hp100}| < 0.35$ mm.

Det har demonstrerats att geometriskt kvalitetssäkrade replikor tillverkade i höghållfast betong uppvisar samma skjuvhållfasthetskaraktistik som ett bergprov av granit, men med ett lägre skjuvspänningsmaximum. Genom detta lämpar de sig för fenomenologiska analyser som stöd i utvecklingen av skjuvhållfasthetskriterier. Dock bör replikor tillsvidare inte användas för att prediktera maximal skjuvhållfasthet förrän orsakerna till de observerade skillnaderna identifieras och kan beaktas.

7. FÖRSLAG PÅ FORTSATT ARBETE

Två av replikorna avvek endast några få hundradels millimeter relativt bergprovet och dessa uppvisade en till bergprovet snarlik skjuvhållfasthetskaraktistik, förutom att skjuvspänningsmaximum var lägre. Det kunde observeras att nötingen för bergprovet av granit var större än för replikaten av höghållfast betong. En analys för att ta reda på vilken materialrelaterad mekanism som ligger bakom skillnaderna och vilken typ av materialtest som kvantifierar denna mekanism föreslås ingå i ett fortsatt arbete. Denna information är av vikt att känna till vid utvecklingen av skjuvhållfasthetskriterier. Detta för att säkerställa att kriterierna endast innehåller relevanta och fysikaliskt kopplade parametrar.

I ett fortsatt arbete föreslås även en känslighetsstudie ingå inom vilken ett antal replikor tillverkas från bergprov utifrån erfarenheterna från detta arbete. Syftet är att utvärdera både spridning och precision. De båda kvalitetssäkringsparametrarna framtagna inom detta projekt tas fram för replikorna och följs av genomförandet av skjuvtester. Spridningen i utfallet mellan replikorna utvärderas och replikornas precision fastställs genom jämförelse med motsvarande bergprov. Spridningen i utfallet från skjuvtesterna jämförs även med spridningen av kvalitetssäkringsparametrarna för att validera både deras relevans och gränsvärden. Genom att utvärdera både hur resultaten för replikaten sprider och hur denna spridning är relaterad till utfallet från bergprovet (precisionen) kan noggrannheten för användningen av replikor kvantifieras, det vill säga med vilken osäkerhet en viss parameter utvärderad från replikor är behäftad med.

Replikorna som studerats inom detta arbete har storleken 70 x 100 mm. I ett fortsatt arbete är det av intresse av att studera replikor med storleken 300 x 500 mm avsedda för den nya skjuvtestutrustningen. En känslighetsstudie motsvarande den ovan beskrivna genomförs för att utöver att utvärdera replikornas osäkerhet även utvärdera tillämpbarheten av de geometriska kvalitetssäkringsparametrarna med tillhörande gränsvärden på denna skala. På grund av de stora massorna som hanteras på skalan 300 x 500 mm måste instyrningen mellan olika konstruktionsdelar innehålla snäva toleranser, vilket potentiellt skulle kunna bidra till en liten spridning mellan replikorna.

De ovan nämnda förslagen ligger utanför det arbete som kommer att utföras inom den förestående avslutande etappen inom det pågående doktorandprojektet. Den avslutande etappen inom doktorandarbetet kommer att fokusera på skjuvtester på prover av granit i olika storlekar och med olika randvillkor som ett led i en ökad förståelse av skaleffekten. Den nya 5 MN skjuvtestutrustningen kommer att användas i detta projekt.

ERKÄNNANDEN

Flera kollegor inom RISE har varit delaktiga i genomförandet av det experimentella arbetet. Mathias Flansbjer och Natalie Williams Portal utvecklade tillverkningsmetoden för replikorna och tillverkade även dessa. Caroline Lägermo utförde efterbearbetningen av kontaktrycksmätningarna med tryckkänslig film. Nämnade kollegor var även delaktiga i genomförandet av skjuvtesterna. Jörgen Spetz genomförde skanningen. Lars Jacobsson ledde POST-projektet. Ett stort tack riktas till dessa personer för deras insatser, vilka utgjort en förutsättning för genomförandet av arbetet som redogörs för i denna rapport.

8. REFERENSER

- Asadizadeh M, Moosavi M, Hossaini MF, Masoumi H (2018) Shear strength and cracking process of non-persistent jointed rocks: an extensive experimental investigation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 51, 415-428. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1328-6>
- Bahaaddini M (2017) Effect of boundary condition on the shear behaviour of rock joints in the direct shear test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 50, 1141–1155.
- Bandis, S (1980) Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints. PhD thesis, University of Leeds.
- Bandis S, Lumsden AC, Barton NR (1981) Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. Abstracts 18, 1-21.
- Barla G, Barla M, Martinotti ME (2010) Development of a new direct shear test apparatus. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 43, 117-122.
- Casagrande, D, Buzzi, O, Giacomini, A. et al. (2018) A New Stochastic Approach to Predict Peak and Residual Shear Strength of Natural Rock Discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 51, 69–99. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1302-3>
- Chryssanthakis P. Oskarshamn site investigation, Drill hole: KSH01A The normal stress and shear tests on joints. SKB Report No. P-04-185 SKB Stockholm 2004 pp 15-16.
- Dae-Young K, Byung-Sik C, Jin-Suk Y (2006) Development of a direct shear apparatus with rock joints and its verification tests. *Geotechnical Testing Journal*. 29 No. 5 Paper ID GTJ12553 www.astm.org
- Fathi A, Moradian Z, Rivard P, Ballivy G (2016) Shear mechanism of rock joints under pre-peak cyclic loading condition. *International Journal of Rock Joints & Mining Services*. 83, 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.01.009>
- Ghazvinian AH, Azinfar MJ, Vaneghi RG (2012) Importance of tensile strength on the shear behaviour of discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 45; 349-359. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0207-9>
- Grasselli G (2001) Shear strength of rock joints based on quantified surface description. Dissertation at Ecole Polytechnique Federale De Lausanne.
- Gui Y, Xia C, Ding W, Qian X, Du S (2019) Modelling shear behaviour of joint based on joint surface degradation during shearing. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 52, 107-131. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1581-3>
- Haberfield CM, Szymakowski J (2003) Application of large scale direct shear testing. *Journal and News of the Australian Geomechanics Society*. 38, 29-39.

- Hans J, Boulon M (2003) A new device for investigating the hydro-mechanical properties of rock joints. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 27, 513-548.
- Hossaini KA, Bababouri N, Nasab SK (2014) The influence of asperity deformability on the mechanical behaviour of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 70, 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2014.04.009>
- Indraratna B, Thirukumaran S, Brown ET, Premadasa W, Gale W (2014) A technique for three-dimensional characterisation of asperity deformation on the surface of sheared rock joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 70, 483-495. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2014.04.022>
- Jiang Q, Feng X, Gong Y, Song L, Ran S, Cui J (2016) Reverse modelling of natural rock joints using 3D scanning and 3D printing. *Computers and Geotechnics*. 73; 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.020>
- Jiang Y, Xiao J, Tanabashi Y, Mizokami T (2004) Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 41, 275-286.
- Jiang Y, Wang Y, Yan P, Luan H, Chen Y (2019) Experimental investigation on the shear strength properties of heterogeneous discontinuities. *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00955-5>
- Johansson F (2016) Influence of scale and matedness on the peak shear strength of fresh, unweathered rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 82, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.11.010>
- Johansson F, Stille H (2014) A conceptual model for the peak shear strength of fresh and unweathered rock joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 69, 31–38.
- Koupouli NJF, Belem T, Rivard P, Effenguet H (2016) Direct shear test on cemented paste backfill – rock wall and cemented paste backfill – backfill interfaces. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 8; 472-479. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.02.001>
- Kumar R, Verma AK (2016) Anisotropic shear behavior of rock joint replicas. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 90, 62–73.
- Larsson J, Flansbjerg M (2020) An Approach to Compensate for the Influence of the System Normal Stiffness in CNS Direct Shear Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 53, 2185–2199. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02051-0>
- Larsson J (2021) Experimental investigation of the system normal stiffness of a 5 MN direct shear test setup and the compensation of it in CNS direct shear tests. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 833, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012011>

- Larsson J, Johansson F, Mas Ivars D, Johnson E, Flansbjer M, Portal N.W (2023a) A novel method for geometric quality assurance of rock joint replicas in direct shear testing – Part 1: derivation of quality assurance parameters and geometric reproducibility. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.011>
- Larsson J, Johansson F, Mas Ivars D, Johnson E, Flansbjer M, Portal N.W (2023b) A novel method for geometric quality assurance of rock joint replicas in direct shear testing – Part 2: validation and mechanical replicability. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.012>
- Lee Y-K, Park J-W, Song J-J (2014) Model for the shear behavior of rock joints under CNL and CNS conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 70, 252 – 263. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.05.005>
- Liu Y, Xu J, Yin G, Peng S (2017) Development of a new direct shear testing device for investigating rock failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 50, 647-651.
- Moradian Z, Gravel C, Fathi A, Ballivy G, Rivard P (2013) Developing a high capacity direct shear apparatus for the large scale laboratory testing of rock joints. *Rock Mechanics for Resources Energy and Environment*. Taylor & Francis Group London ISBN 978-1-138-00080-3.
- Muralha J, Grasselli G, Tatone B, Blümel M, Chryssanthakis P, Yujing J (2014) ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints Revised Version. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 47, 291-302
- Rao KS, Shrivastava AK, Singh J (2009) Development of an automated large scale direct shear testing machine for rock IGC Guntur doi:
<https://www.researchgate.net/publication/265407964>
- Shrivastava AK, Rao KS (2015) Shear behaviour of rock joints under CNL and CNS boundary conditions. *Geotechnical and Geological Engineering*. 33, 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9896-2>
- Shrivastava AK, Seshagiri Rao K (2018) Physical modelling of shear behaviour of infilled rock joints under CNL and CNS boundary conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 51, 101-118.
- Singh HK, Basu A (2018) A comparison between the shear behaviour of ‘real’ natural rock discontinuities and their replicas. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 51; 329-340. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1334-8>
- Tatone, B.S.A., Grasselli, G. (2013) An Investigation of Discontinuity Roughness Scale Dependency Using High-Resolution Surface Measurements. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 46, 657–681. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0294-2>
- Thirukumaran S, Indraratna B (2016) A review of shear strength model for rock joints subjected to constant normal stiffness. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 8, 405-414.

- Xia C, Yu Q, Gui Y, Qian X, Zhuang X, Yu S (2018) Shear behaviour of rock joints under CNS boundary condition. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Rock Mechanics and Rock Engineering*. Shanghai, May 27–30
- Yong, R, Qin, J, Huang, M. et al. (2019) An Innovative Sampling Method for Determining the Scale Effect of Rock Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 52, 935–946. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1675-y>
- Zhang X, Jiang Q, Chen N, Wei W, Feng X (2016) Laboratory investigation on shear behaviour of rock joints and a new peak shear strength criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 49, 3495-3512. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1012-2>
- Zhu JB, Li H, Deng JH (2019) A one-dimensional elastoplastic model for capturing the nonlinear shear behaviour of joints with triangular asperities based on direct shear tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 52, 1671–1687.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773