

MEKANISKA EGENSKAPER HOS STORA BERGSPRICKOR

MECHANICAL PROPERTIES OF LARGE ROCK JOINTS

Lars Jacobsson, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås

Jörgen Larsson, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås

Mathias Flansbjer, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås

Diego Mas-Ivars, Svensk Kärnbränslehantering AB, Solna; KTH Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm

Hossein A Kasani, Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Toronto

Fredrik Johansson, KTH Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm

Sammanfattning

Experimentella undersökningar av skjuvegenskaperna hos bergsprickor i hårt berg har generellt fokuserat på mindre sprickprover för normalspänningar på upp till 20 MPa, representativa för ett kärnbränsleförvar på ca 400 meters djup. Vid stora sprickprover har skjuvegenskaperna generellt bestämts för låga spänningar, på någon eller några MPa. För att få en förståelse för inverkan av sprickornas storlek för skjuvegenskaperna vid höga normalspänningar är det avgörande att genomföra skjuvförsök på stora bergsprickor (> 200 mm) i hårt berg under höga normalspänningar.

I projektet Parameterization of Fractures, POST (2014–2016), studerades skaleffekterna genom in situ-försök, småskaliga skjuvförsök och beräkningssimuleringar. Det konstaterades att laboratorieexperiment under kontrollerade förhållanden och på stora bergprover är nödvändiga för att få tillförlitliga resultat. Det konstaterades också att in situ-försök är komplexa med stora underliggande osäkerheter och är samtidigt kostsamma.

I det pågående projektet POST 2 som startade 2017 har bergsprickor på upp till 500 mm provats i en ny unik laboratorieutrustning, jämte provning av mindre sprickor, vid höga normalspänningar för både CNL och CNS förhållanden och med ny mätteknik. Teknik för att tillverka replikaprover av bergsprickor har utvecklats och provats med syfte att göra lastparameterstudier. Kvaliteten hos geometriavbildningen hos replikaproverna och sprickornas geometrier har uppmätts med högupplöst skanning. I denna artikel presenteras en del av resultaten från projektet. Resultaten från projektet är tillämpbara för andra områden med undermarkskonstruktioner såsom projektering av tunnlar och bergrum för infrastrukturprojekt och gruvor.

Nyckelord

Provningsutrustning, bergsprickor, normalbelastningsförsök, direkta skjuvförsök, sprickstyvhet, konstant normalstyvhet CNS, digital image correlation DIC

Summary

Experimental investigations of the shear properties of rock fractures in hard rock have generally focused on tests on smaller fractures for normal stresses of up to 20 MPa, representative of a nuclear waste repository at a depth of about 400 meters. The shear properties of large fractures, determined at experiments, have generally been determined at low stresses, of one or more MPa. To gain an understanding of the effect of the size on the shear properties of the fractures at high normal stresses, it is crucial to perform shear experiments on large rock fractures (> 200 mm) in hard rock under high normal stresses.

In the project Parameterization of Fractures, POST (2014–2016), the scale effects were studied by in situ experiments, small-scale shear experiments and computational simulations. It was found that laboratory experiments under controlled conditions and on large rock samples are necessary to obtain reliable results. It was also found that *in situ* experiments are complex with large underlying uncertainties and are at the same time costly.

In the ongoing POST 2 project, which started in 2017, rock fractures up to 500 mm have been tested in a new unique laboratory equipment, along with tests on smaller fractures, at high normal stress for both CNL and CNS conditions and with new measurement technology. Techniques for producing replica samples of rock fractures have been developed and tested with the aim of making load parameter studies. The quality of the geometry imaging of the replica samples and the geometries of the fractures has been measured by high-resolution scanning. This article presents some of the results from the project. The results from the project are applicable to other areas with underground construction, such as the design of tunnels and rock caverns for infrastructure projects and mines.

Keywords

Test equipment, rock joints, normal load tests, direct shear tests, rock joint stiffness, constant normal stiffness CNS, digital image correlation DIC

1 Inledning

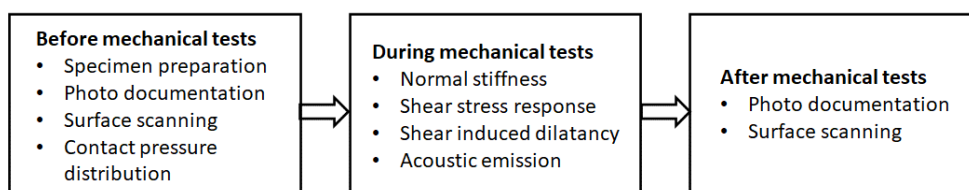
Mekaniken hos bergsprickor är av stor betydelse för de mekaniska och hydrologiska egenskaperna i en bergmassa. Att noggrant kunna prediktera bergmassans egenskaper är viktig för flera bergmekaniska tillämpningar, såsom infrastruktur, tunneldrivning, gruvdrift, vattenkraft, geotermisk energi, geologiskt förvar t ex för använt kärnbränsle och koldioxidlagring. Det saknas idag kunskap om det mekaniska beteendet för

bergsprickor i en kristallin bergmassa i större skala på flera hundra meters djup. Det gäller till exempel sprickstyvhet och skjuvhållfasthet för normalspänning i storleken 5 till 10 MPa (och däröver), vilket representerar spänningstillståndet *in situ* för dessa djup. Kunskap saknas om hur mycket normalspänningen och skjuvhållfastheten hos sprickor ökar vid större djup då bergmassan motverkar dilatans vid skjuvning av sprickor, framförallt för väl passade naturliga sprickor som har inget eller endast en liten mängd fyllnadsmaterial. Denna effekt brukar modelleras som att bergmassan har en konstant normal styvhet (CNS). Kunskap saknas även vid mindre djup för sprickor i större skala där bergmassan obetydligt ökat motstånd och efterliknas med att bergmassan bidrar med en konstant normalbelastning/-spänning (CNL). Tidigare och nuvarande *in situ* och laboratorieexperiment med skjuvförsök, med några få undantag, har utförts antingen på små prover (upp till 200 mm) eller på större prover vid låga normalspänningar (upp till 1–2 MPa). En viktig fråga att ta reda på är hur storleken av en spricka påverkar de mekaniska egenskaperna eftersom tidigare experiment har gjorts på sprickor i mindre skala och sprickorna i naturlig bergmassa är i en större skala.

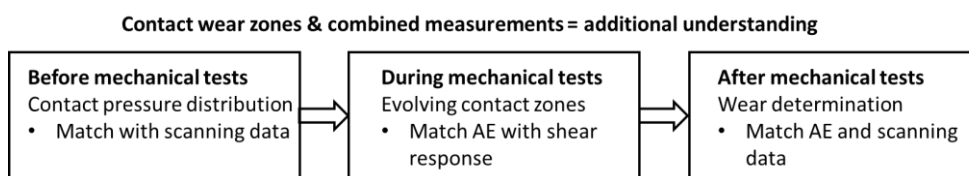
Den dåliga kunskapen om hur sprickor i större skala beter sig i en bergmassa på stora djup identifierades av kärnbränslehanteringsföretagen i Finland (Posiva Oy), Sverige (SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB) och Kanada (NWMO, Nuclear Waste Management Organization) som en viktig fråga för att minska osäkerheten i prognoserna vid säkerhetsbedömningarna av kärnavfallsförvar. Detta ledde till den första fasen av projektet Parametrisation of structures (POST) som var ett samverkansprojekt och som genomfördes under åren 2014–2016, med fokus på direkta skjuvförsök i fält (*in situ*) och numerisk modellering av stora sprickor (Siren et al. 2017). En av rekommendationerna från det projektet var att studera det mekaniska beteendet hos sprickor i större skala under kontrollerade laboratorieförhållanden för att öka noggrannheten i prediktioner av skjuvhållfastheten vid de belastningsförhållanden som råder på stora djup (CNS-förhållanden enligt ovan). Slutsatsen från Siren et al. (2017) var att det valda tillvägagångssättet med fältförsök är förenat med komplikationer, såsom att hitta representativa sprickor, svårigheter att genomföra experimenten, stora osäkerheter i resultaten och att det är kostnadsineffektivt. En studie av skaleffekten rekommenderades också för att bättre förstå hur skjuvhållfastheten och det mekaniska beteendet kan variera med provskalan. Slutligen föreslog Siren et al. (2017) att replikor av verkliga bergsprickor skulle användas, vilka tillverkas och kan ge representativa mekaniska egenskaper. Med replikorna kan studier av olika belastningar repeteras på en och samma sprickgeometri för att bättre förstå samverkan mellan sprickgeometri och belastningar. En andra fas av POST-projektet initierades 2017, där flera av de givna rekommendationerna är inkluderade. Bland annat har teknik för att tillverka replikor utvecklats och utvärderats genom provningar, samt undersökningar av bergsprickor i tre olika storleksskalor, 35×60 mm, 70×100 mm och 300×500 mm genomförts. I projektet deltar NWMO och SKB i samarbete med RISE (tidigare SP

Sveriges Tekniska Forskningsinstitut) och KTH, Kungliga Tekniska Högskolan. En större beskrivning av projektets innehåll presenterades i Jacobsson et al (2021).

I denna artikel presenteras en delmängd av de resultat från provningar som har utförts på naturliga (N) och dragbelastningsinducerade bergsprickor (TI) i den största storleken (300×500 mm). Den naturliga sprickan representerar en väl passad men öppen spricka som har bara en liten mineralisering och den dragbelastningsinducerade sprickan representerar en färsk rå icke-vittrad spricka. För att kunna genomföra experimenten har en ny utrustning konstruerats och tillverkats för att kunna utföra direkta skjuvförsök på stora bergsprickor med en längd på upp till 600 mm under höga normalspänningar och styvhetsförhållanden. Utrustningen är unik på grund av sin höga lastkapacitet på 5 MN i både normal- och skjuvriktning och den relativt stora provstorleken upp till 400×600 mm. En annan ny utveckling som har gjorts och implementerats för denna typ av experiment är direkta mätningar av sprickdeformationer under både normalbelastning och skjuvförsök med ett optiskt mätsystem. Systemets prestanda valideras genom normalbelastningsförsök och direkta skjuvförsök på ett stålprov och på de två typerna av bergprover med en väl passad naturlig spricka (N) och en dragbelastningsinducerad spricka (TI). Betydelsen av en lokal deformationsmätning för bestämning av spricktyvhet visas. En experimentell procedur för karakterisering före, under och efter skjuvförsök utvecklades och har genomförts (Figur 1). I denna artikel presenteras emellertid endast de delar som relaterar till de mekaniska försöken. Tanken är att en kombination av flera olika parallella mätningar ska ge ytterligare förståelse för de processer som sker vid en sprickrörelse. Figur 2 visar hur olika mätningar används för att kunna studera processområdet under en skjuvning där kontaktytorna nöts mot varandra. Innehållet i denna artikel baseras till stora delar på Jacobsson et al (2023).



Figur 1. Övergripande arbetsflöde och mätningar.

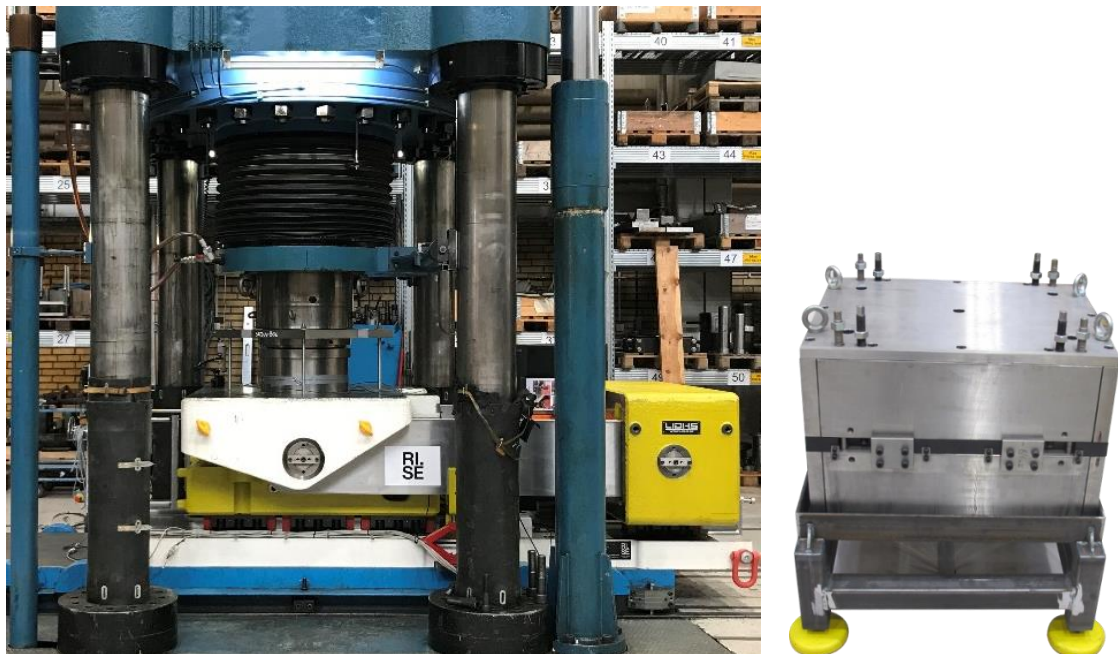


Figur 2. Olika mätningar och steg för att studera kontaktzonerna i en spricka.

2 Utrustning

En ny utrustning för mekaniska och hydromekaniska prov av bergsprickor upp till en storlek på 400×600 mm har konstruerades och tillverkats. Konstruktionen bygger på tidigare erfarenhet hos RISE av att utföra normalbelastningsprov och direkta skjuvförsök på bergsprickor (t.ex. Jacobsson & Flansbjer 2005 och Jacobsson et al. 2012) samt ISRM:s rekommendationer (Muralha et al. 2014). En befintlig belastningsutrustning, en fyrpelarmaskin med en kapacitet på 20 MN som finns hos RISE i Borås (Siren et al. 2017), används för att belasta proverna i normalriktningen. Skjuvdelens består av en fristående modul med en hydraulisk cylinder på 5 MN som ger kraften i skjuvriktningen på en övre och undre skjuvbox där bergprovet är monterat (Figur 3). Bergprover kan skjuvas på upp till ca. 70 mm under antingen CNL- eller CNS-villkor i normalriktningen under belastningar på upp till 5 MN i både normal- och skjuvriktningen motsvarande en medelspänning på 20,8 MPa vid den största provstorleken.

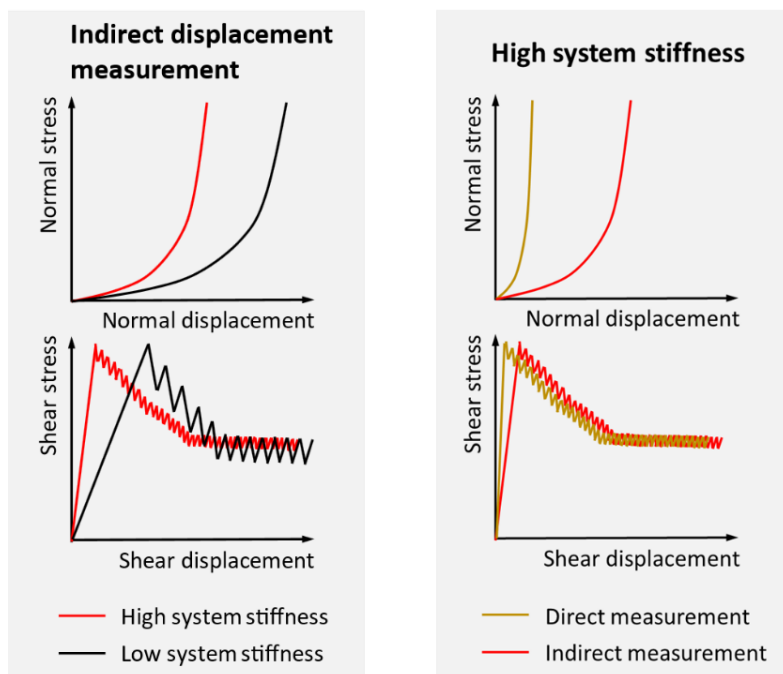
Ett av konstruktionskriterierna vid utvecklingen av den nya storskaliga skjuvutrustningen var att behålla bergsprickorna ostörda under fastgjutningen av prover i provhållarna och vid monteringen av provhållare i skjuvboxarna. Detta åstadkoms genom precisionstillverkade provhållare och skjuvboxar och användning av ett system för exakt positionering av provhållarna relativt varandra under dessa steg (Figur 3).



Figur 3 Vänster: Skjuvmodul (gul/vit) och belastningsmaskin; Höger: Provhållare med referenspositioneringssystem.

Ett annat viktigt kriterium var att ha en hög systemstyvhet (vilket ger små deformationer för provuppställningen). En hög styvhet i normalriktningen är viktig för att lättare kunna bibehålla rätt värde för normalstyvheten vid belastningsförhållanden under CNS. För att nå önskat styvhetsvärde (som representerar bergmassans styvhet) under provningen görs en kompensation för deformationer som genereras i utrustningen och de ingjutna proverna under belastning vilka kan modelleras som en ekvivalent systemstyvhet. Med en högre systemstyvhet blir kompensationen mindre och man får en bättre noggrannhet av den påförda belastningen. En hög styvhet i skjuvriktningen är viktig för styrbarheten av experimenten i skjuvriktningen då man önskar att skjuva sprickorna med en konstant skjuvhastighet. Vid skjuvning kommer skjuvmotståndet (friktionen) i sprickan variera, vilket kan ge ett stick-slip beteende. Med en hög systemstyvhet kommer spänningsvariationen minska under skjuvningsprocessen. I Figur 4 illustreras skillnaderna schematiskt mellan en utrustning med låg respektive hög systemstyvhet. Rullager dimensionerade för stora krafter används för att få en låg friktion i utrustningen under skjuvning.

Ett nytt optiskt system för direkta mätningar och ett konventionellt system för indirekta mätningar av sprickförskjutning används. De optiska direkta mätningarna, som baseras på en 2D digital bildkorrelationsteknik (DIC), se exempelvis Sutton et al. (2009), görs direkt över sprickan., Bilder tas med CCD-kameror (machine vision, 2448×2048 pixlar) på fyra ytor (ca. 55×45 mm), två till vänster och två på höger sida nära provets fram-



Figur 4 Betydelse av låg och hög systemstyvhet samt direkta och indirekta deformationsmätningar.

och bakkanter i förhållande till skjuvriktningen. Ytorna, som innefattar sprickan, har ett pålagt speckelmönster där förskjutningsfältet beräknas och övervakas. De lokala normal- och skjuvförskjutningarna bestämdes med en virtuell 2D-extensometer med en ekvivalent mätlängd på mellan 10–15 mm. Den virtuella extensometern mätte mellan två punkter (facetter) bestämda av 25×25 pixlar placerade på vardera sidan av sprickan, vilket gav en upplösning på cirka 0,3 µm för både normal- och skjuvförskjutningskomponenterna.

I det konventionella sättet att indirekt bestämma sprickförskjutningar i normal- och skjuvriktningen vid skjuvförsök mäts den relativa förskjutningen mellan den övre och nedre skjuvboxen med förskjutningsgivare. I vårt fall mäts förskjutningar med LVDTs på fyra ställen i normalriktningen vilket ger dilatansen och på två ställen i skjuvriktningen vilket ger skjuvförskjutningen. Medelvärdet av både de direkta och indirekta mätningarna på de olika ställena presenteras i resultaten.

Att göra direkta mätningar lokalt över sprickan är avgörande för att kunna bestämma sprickstyvheter men även vid vilken deformation skjuvning börjar. Vid en direkt lokal deformationsmätning blir den uppmätta deformationen

$$\delta_{\text{mätning}} = \delta_{\text{spricka}}$$

Om man däremot inte mäter över sprickan inkluderas även andra deformationer

$$\delta_{\text{mätning}} = \delta_{\text{spricka}} + \delta_{\text{betong}} + \delta_{\text{maskin}}$$

Skillnaderna i resultat för de två sätten att mäta deformationer illustreras i Figur 4. Det går att bestämma deformationerna i systemet $\delta_{\text{betong}} + \delta_{\text{maskin}}$ och dra bort bidragen från dessa för att erhålla deformationen över sprickan δ_{spricka} men det ger en dålig noggrannhet (Jacobsson & Flansbjer 2005). I standarden för skjuvprovning i laboratorium (Muralha et al. 2014) rekommenderas att man gör denna kompensation när indirekt (icke-lokal) deformationsmätning används.

Provningsutrustningens funktion och verifikation av försöken validerades genom att köra en normal- och skjuvbelastning på ett stålprov. Systemdeformationen mättes i normalriktningen (Larsson 2021) från vilket det effektiva normala styvhetsvärdet som användes under CNS-testerna beräknades enligt proceduren som anges i Larsson & Flansbjer (2020).

3 Experiment

Proverna är tillverkade från två olika stenblock av medelkornig granit från Flivik stenbrott nära Oskarshamn. Blocken har en naturlig spricka med en orientering längs klyvplanet (*eng. grain plane*) också kallat ståklov. Parallellt med den naturliga sprickan togs mindre block ut som spräcktes med slägga och kilar så de draginducerade sprickorna fick samma orientering som de naturliga. Materialen bearbetades i flera steg

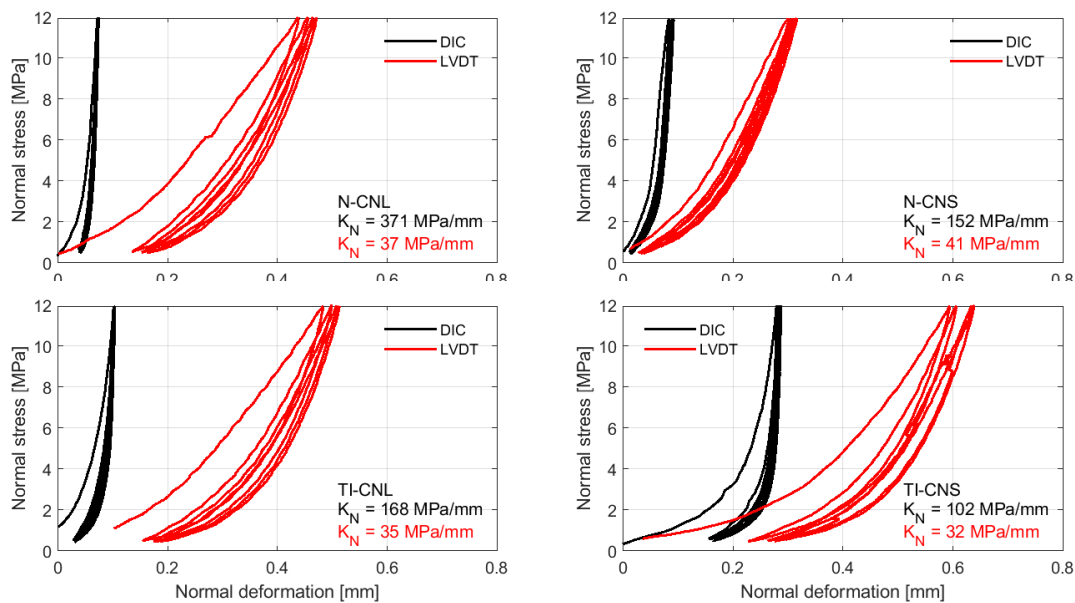
för att nå den slutliga storleken på 300×500 mm. Det gav två typer av prover med ostörda sprickuppsättningar, täta naturliga sprickor med små vittrings- och fyllnadsmaterial och draginducerade, färska och perfekt matchande sprickor. Bergmaterialet hade följande uppmätta mekaniska egenskaper (Larsson et al. 2022): Elasticitetsmodul 72,9 GPa, enaxiell tryckhållfasthet 267,9 MPa, direkt draghållfasthet 10,7 MPa och indirekt draghållfasthet mätt med Brazilian tests 13,8 MPa. De naturliga sprickornas basfriktionsvinkel bestämdes till 23,9° genom tiltförsök på ett antal sprickor (Alejano & Pérez-Ray (2020)).

Flera mätningar gjordes före, under och efter de mekaniska försöken (Figur 1). Här beskrivs enbart normalbelastningsförsöken och de direkta skjuvförsöken. Provingen startas med perfekt passade sprickor. Belastningsförsöken i normalriktningen börjar med en förlast på 0,5 MPa följt av fyra belastningscykler 0,5–12 MPa med en på- och avlastningshastighet på 10 MPa/min för att gradvis konsolidera (trycka ihop) sprickan. Efterföljande direkta skjuvförsök börjar med att lägga på en normalspänning (σ_{N0}) på 5 MPa vid 5 MPa/min. Under detta steg hölls skjuvdeformationen konstant till 0 mm. Skjuvningen utfördes med en konstant kolvrörelse hos cylindern i skjuvriktningen på 0,5 mm/min upp till 50 mm förskjutning eller upp till en normalkraft på 5 MN (vid CNS-försök), beroende på vilket som uppnås först. Vid CNS-försöken simulerades en bergmassa med en effektiv normalstyvhet på 10 MPa/mm. För att proverna skulle uppleva detta värde applicerades ett högre värde vid styrningen av maskinen, 11.5 MPa/mm för denna provserie, för att kompensera att en del av deformationerna tas upp i utrustningen och i ingjutningsmaterialet, se diskussion ovan. Metoden för att bestämma maskinstyvheten och kompensera för denna beskrivs i Larsson (2021).

4 Resultat

4.1 Normalbelastningsförsök

Resultaten från normalbelastningsförsöken visas i Figur 3. De direkta deformationsmätningarna (DIC) visar en sprickslutning på 0,08–0,28 mm vid första pålastningen där en detalj är en initial konsolidering som ger en kvarstående sprickslutning. Värdena som mäts genom indirekta mätningar med LVDT visar mycket större värden (0,45–0,60 mm). Sprickan når nästan ett elastiskt ”shakedown”-tillstånd efter fyra belastningscykler. Sprickstyvheten vid den fjärde belastningen (K_N) beräknas som sekanten mellan 0,5 och 12 MPa och ligger i intervallet 100–370 MPa/mm baserat på lokala DIC-mätningar och 32–41 MPa/mm baserat på indirekta LVDT-mätningar.

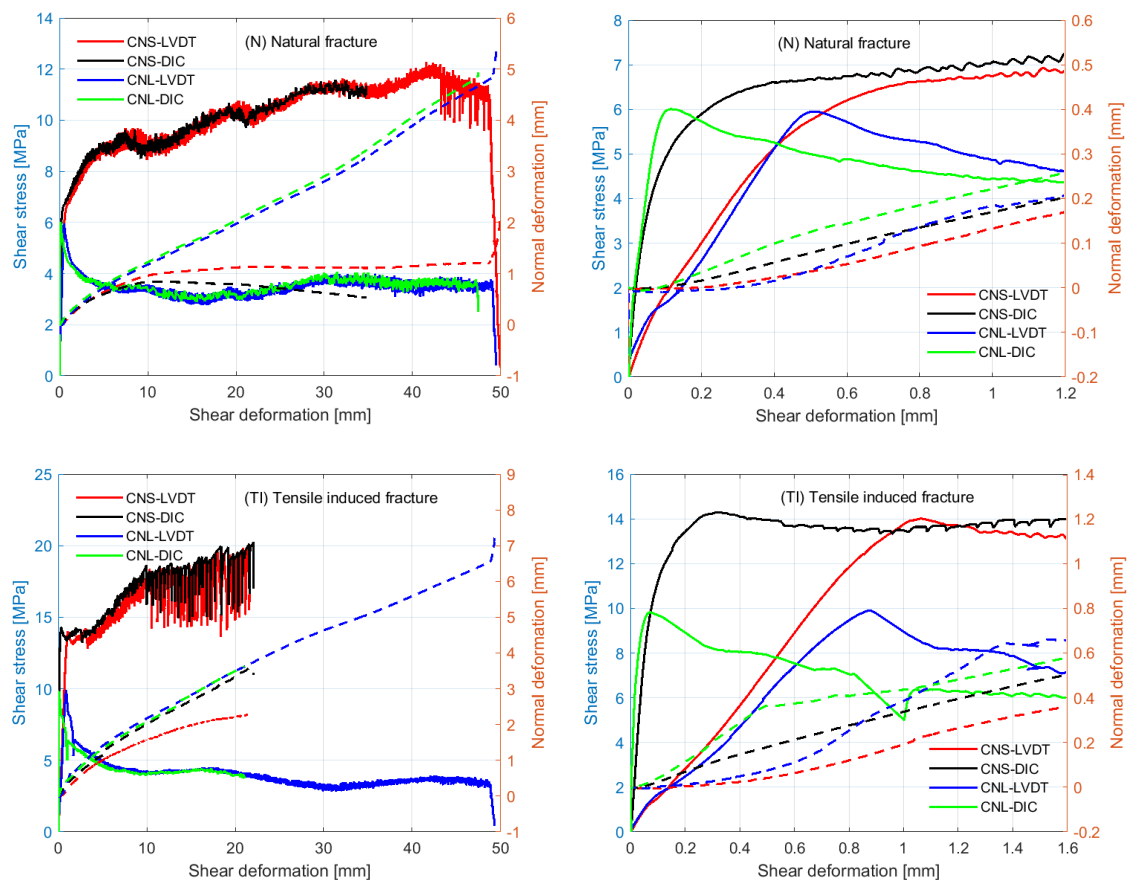


Figur 3. Normalspänning och normaldeformation samt sprickstyvheter.

4.2 Direkta skjuvförsök

Resultaten från de direkta skjuvförsöken visas i Figur 4. Början av skjuvning i sprickan definieras som skjuvförskjutning som genererar en dilatans, d v s cirka 0,1 mm (N) och 0,05 mm (TI) från lokala mätningar (DIC i Figur 4, höger). Skjuvspänningen vid skjuvrörelsens början är cirka 6 MPa (N) respektive 10 MPa (TI). Vid CNL-försöken är det en distinkt topp följt av en betydligt lägre restspänning och ett fortskridande dilatant beteende (sprickvidgning) under hela skjuvningen. Beteendet vid CNS-villkor visar en ökande skjuvspänning på grund av en ökad normal spänning orsakad av dilatans. Dilatanshastigheten minskar så småningom på grund av den ökande normalspänningen och är nästan noll runt 10 mm (N) och 20 mm (TI) skjuvförskjutning och hålls nästan konstant efter det. Provningsen av TI1-CNS avbröts när normalkraften ökade och nådde det högsta tillåtna värdet.

Skillnaden mellan de direkta och indirekta mätningarna i det ”elastiska” området, när ingen glidning sker i sprickan, visas i de uppförstorade figurerna av det initiala beteendet (Figur 4, höger). Den elastiska sekantstyvheter före topp definieras som värdena mellan 0,5 och 5 MPa (N) och 0,5 och 9 MPa (TI) och var 12–15 MPa/mm (N+TI) baserat på LVDT och 40–70 MPa/mm (N) samt 150–220 MPa/mm (TI) för lokala mätningar med DIC.



Figur 4. Skjuvspänning och normalförskjutning (dilatans) mot skjuvförskjutning för CNS- och CNL-prover. Helderagna linjer visar skjuvspänningar och streckade linjer normalförskjutning. Vänster: fullskala; Höger: närbild på det elastiska området. Observera att diagrammen har olika skalor.

5 Diskussion och slutsatser

En ny utrustning konstruerades för att genomföra experiment på stora bergprover med höga krafter och simulerad styvhet hos bergmassan, vilket gör den till den första i sitt slag på grund av sin unika kapacitet. Systemets prestanda demonstrerades och utvärderades genom referensförsök på ett stålprov. Systemets funktion demonstrerades, särskilt under CNS-belastningsförhållanden, genom att prova bergprover med täta och mycket dilatanta sprickor. Stegen för att tillverka stora bergprover med ostörda sprickor, förbereda dem för experiment och genomföra kontrollerade experiment verifierades. Systemets styvhet, baserat på kraftförskjutningsdata exklusive deformationer som inte tillhör provet, var ca. 10 000 kN/mm i normalriktningen (Larsson 2021) och ca. 750 kN/mm i skjuvriktningen och bestämdes från de experiment som rapporterats här.

Det optiska systemet för direkt mätning av lokal deformation är en viktig komponent och ett viktigt bidrag eftersom mätningarna blir mer exakta och ger en ny insikt om deformationsprocessen vid skjuvrörelsens början. Starten av en skjuvrörelse i en spricka

(åtföljd av dilatans) sker vid små skjuvdeformationer (0,05–0,1 mm). En del av de uppmätta värdena är elastisk deformation av bergmaterialet självt, men är försumbar eftersom den uppskattas vara mindre än 10 % av de uppmätta värdena. Den uppmätta normalstyvheten ligger inom intervallet för tidigare mätningar av styvhet på naturliga kristallina bergsprickor som gjorts med hjälp av direkta mätningar fastän då med fysiska givare (t.ex. Jacobsson et al 2012). Det finns inga jämförbara data om elastisk skjuvstyvhet i litteraturen när direkta mätningar har använts. Sprickstyvheterna är mycket högre när data baserade på direkta istället för indirekta mätningar används.

Utrustningen byggdes för att studera beteendet hos stora sprickor vid hög belastning under kontrollerade förhållanden. Den största provstorleken är något mindre än storleken 700×700×350 mm som rekommenderas i standarderna för skjuvförsök av bergsprickor *in situ*, ISRM (1974) och ASTM (2002), men är fortfarande jämförbar i storlek. Detta var en avvägning som gjordes men som bedömdes vara acceptabel eftersom tidigare studier av skaleffekter, t.ex. Bandis et al. (1981), har visat att den huvudsakliga minskningen av skjuvstyrkan hos sprickor sker inom de första decimetrarna av provstorleken. Storleken av maskinen medger att prover med en diameter på 300–400 mm effektivt kan tas ut i djupa tunnlar med konventionell borrhutrustning med sprickplanet orienterat längs kärnan som i Jacobsson (2016). Ett alternativt tillvägagångssätt skulle vara en mer kostsam linsågning av de bergblock som krävs.

Ett annat mål med projektet är att tillhandahålla högkvalitativa data, från de mekaniska försöken och de parallella kompletterande mätningarna, för detaljerad forskning om de återstående frågorna om sprickbeteende, och för att kunna förbättra befintliga eller utveckla nya konstitutiva samband för bergsprickor.

6 Erkännanden

Arbetet och utrustningen har finansierats av SKB, NWMO, BeFo och RISE. I arbetet har ytterligare personer på RISE medverkat förutom författarna.

Referenser

Alejano, L.R. & Pérez-Rey, I., 2020. Basic friction angle of intact granitic rock and concrete planar contacts by means of tilt testing – Final report, University of Vigo, Spain. (Unpublished report)

ASTM D 4554–02. 2002. Standard test method for in situ determination of direct shear strength of rock discontinuities, ASTM International, West Conshohocken, USA.

Bandis, S., Lumsden, A.C. & Barton, N.R. 1981. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geom. Abs.* 18, pp. 1–21.

ISRM. 1974. Suggested method for shear strength, Part 1, Suggested method for in situ shear determination of direct shear strength. Committee on Field tests, Document No 1, Final draft. ISRM

Jacobsson, L. 2016. Parametrisation of Fractures - Direct Shear Tests on Calcite and Breccia infilled Rock Joints from Äspö HRL under Constant Normal Stiffness Condition. Workreport 2016-19, Posiva OY, Eurajoki, Finland

Jacobsson L. & Flansbjer M. 2005. Borehole KFM05A. Normal stress test with direct and indirect deformation measurement together with shear tests on joints. Forsmark site investigation. Report SKB P-05-141, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Jacobsson L., Flansbjer M. & Larsson, J. (2023). Direct shear tests on large natural and artificially induced rock fractures in laboratory. In: Proceedings of the ISRM 15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering, Schubert, W. & Kluckner, A. (eds), Salzburg, Austria, October 9-14, 2023. Austrian Society for Geomechanics: Salzburg. pp. 2709-2714.

Jacobsson, L., Glamheden, R., Hakami, E. & Olofsson, I. 2012. Rock mechanics laboratory testing in SKB site investigation program. EUROCK 2012, May 28-30, 2012. Stockholm, Sweden.

Jacobsson, L., Mas Ivars, D., Kasani H. A., Johansson, F. & Lam, T. 2021. Experimental program on mechanical properties of large rock fractures. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 833 012015. DOI:/10.1088/1755-1315/833/1/012015

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. DOI: 10.1088/1755-1315/833/1/012011

Larsson, J. & Flansbjer, 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, pp. 2185–2199, DOI: 10.1007/s00603-020-02051-0

Larsson, J., Johansson, F., Mas Ivars, D., Johnson, E., Flansbjer, M. & Portal, N.W. 2023. A novel method for geometric quality assurance of rock joint replicas in direct shear testing – Part 2: Validation and mechanical replicability, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. DOI: /10.1016/j.jrmge.2022.12.012

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 Mech Rock Eng 47, pp. 291–302. DOI: 10.1007/s00603-013-0519-z

Siren, T., Hakala, M., Valli, J., Christiansson, R., Mas Ivars, D., Lam, T., Mattila, J. & Suikkanen, J. 2017. Parametrisation of Fractures - Final Report, Posiva Report 2017-1, Posiva OY, Eurajoki, Finland

Sutton, M.A., Orteu, J.J. & Schreier, H. 2009. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications, Springer Verlag.