© 2026 Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors.

EXPERIMENTELLT PROGRAM OM MEKANISKA EGENSKAPER HOS STORA SPRICKOR I KRISTALLINT BERG

EXPERIMENTAL PROGRAM ON MECHANICAL PROPERTIES OF LARGE JOINTS IN CRYSTALLINE ROCK

Lars Jacobsson, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås
Diego Mas-Ivars, SKB Svensk Kärnbränslehantering AB, Solna
Fredrik Johansson, KTH Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
Hossein A Kasani, Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Toronto
Jörgen Larsson, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås
Mathias Flansbjer, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås
Erland Johnson, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås

Sammanfattning

Att förutsäga sprickförskjutningar är en av de viktigaste faktorerna i säkerhetsbedömningarna av ett djupt geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle och är viktiga för andra anläggningar. Laboratorie- och *in situ*-experiment används för att uppskatta dessa egenskaper. Trots betydande bidrag under de senaste decennierna har det funnits en kunskapslucka kring de mekaniska egenskaperna hos stora sprickor på stora djup under inverkan av bergmassans styvhet (konstant normalstyvhet, CNS) och höga normalspänningar. Genom POST-projektet har SKB (Sverige), NWMO (Kanada) och Posiva från Finland (endast i fas 1) samarbetat för att studera dessa frågor. Efter rekommendationer från projektfas 1 (som var främst inriktad på *in situ*-experiment och numerisk modellering) har den andra fasen av POST-projektet fokuserat på att ta fram data från normalbelastnings- och skjuvförsök i kontrollerad laboratoriemiljö för att kunna generera resultat med hög kvalitet. Provningar har genomförts på naturliga och draginducerade sprickor i granitprover i tre storlekar, 35×60 mm, 70×100 mm och 300×500 mm, samt replikor av bergsprickor (70×100 mm), under representativa spänningsförhållanden som råder på stora djup vid kontrollerade laboratorieförhållanden. En rad stora experimentella framsteg har gjorts i projektet. En unik utrustning för direkta skjuvförsök har utvecklats på RISE som kan ta prover upp till 400×600 mm och kan belasta sprickor upp till 20 MPa i normal- och skjuvriktningen under både CNS- och CNL-förhållanden (Constant Normal Load), med möjlighet att skjuva provet upp till 50 mm. Karakteriseringar har genomförts före, under och efter skjuvförsök med hjälp av högupplöst optisk skanning, kontakttrycksmätningar, lokala mätningar av sprickdeformationer med hjälp av Digital Image Correlation (DIC) och akustiska emissionsmätningar under skjuvförsöken.

Nyckelord

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

Summary

Predicting fracture displacements is one of the most important factors in the safety assessments of a deep geological final repository for spent nuclear fuel and is important for other facilities. Laboratory and in-situ experiments are used to estimate these properties. Despite significant contributions in recent decades, there has been a knowledge gap about the mechanical properties of large fractures at great depths under the influence of rock mass stiffness (Constant Normal Stiffness, CNS) and high normal stresses. Through the POST project, SKB (Sweden), NWMO (Canada) and Posiva from Finland (only in phase 1) have collaborated to study these issues. Following recommendations from project phase 1 (which was mainly focused on *in situ* experiments and numerical modelling), the second phase of the POST project has focused on producing data from normal loading and direct shear tests in a controlled laboratory environment to generate high-quality results. Tests have been carried out on natural and tensile-induced fractures in granite specimens in three sizes, 35×60 mm, 70×100 mm and 300×500 mm, as well as replicas of rock fractures (70×100 mm), under representative stress conditions prevailing at great depths under controlled laboratory conditions. Several major experimental advances have been made in the project. A unique equipment for direct shear tests has been developed at RISE that can take samples up to 400×600 mm and can load fractures up to 20 MPa in the normal and shear direction under both CNS and CNL (Constant Normal Load) conditions, with the possibility of shearing the specimen up to 50 mm. Characterizations have been carried out before, during and after shear tests using high-resolution optical scanning, contact pressure measurements, local measurements of crack deformations using Digital Image Correlation (DIC) and acoustic emission measurements during the shear test.

Keywords

Shear test equipment, rock joints, normal loading tests, direct shear tests, rock joint stiffness, constant normal stiffness CNS, digital image correlation DIC

1 Inledning

1.1 Bakgrund och motivering

Bergsprickor har stor inverkan på de mekaniska och hydrogeologiska egenskaperna i en bergmassa, t.ex. infrastruktur, gruvdrift, vattenkraft, geotermisk energi och koldioxidlagring. Prediktioner av sprickförskjutningar i ett geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle är en av de aspekter som ingår i säkerhetsanalyen av förvaret. Exempelvis anses att en hypotetisk sekundär skjuvförskjutning på över 50 mm längs en spricka som korsar ett depositionshål under en postglacial jordbävning kunna vara skadlig för kopparkap-

slarna i KBS-3-konceptet (SKB 2011). Dessutom kan normal- eller skjuvförskjutningar hos sprickor, inducerade av termisk, glacial eller seismisk belastning, också förändra grundvattenflödet. Tidigare och nuvarande *in situ*- och laboratorieexperiment med skjuvförsök har, med några få undantag, 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 sprickstorleken påverkar de mekaniska egenskaperna eftersom tidigare experiment har gjorts på sprickor i mindre storlek och sprickorna i naturlig bergmassa är i en större storlek. Den bristande kunskapen om hur stora sprickor 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 till stor del innehöll *in situ*-experiment och numerisk modellering (Siren et al. 2017).

Baserat på lärdomarna och rekommendationer från den första fasen har den andra fasen av POST-projektet, denna gång med deltagande av NWMO och SKB och i samarbete med RISE och KTH, fokuserat på generering av en högkvalitativ datamängd i laboratoriemiljö med flera parallella karakteriseringsmetoder som kan användas för att förbättra konstitutiva relationer och numerisk modellering av sprickors beteende som verifieras av framtagna data. Denna artikel presenterar, bakgrund och en översikt av genomfört arbete, resultat och viktigare bidrag till bergmekanikområdet.

1.2 Kunskap om bergsprickors mekaniska egenskaper

Det mekaniska beteendet hos bergsprickor beror på *bergmaterialet*, *sprickgeometrin*, *belastningstillståndet* och *sprickornas storlek*. Bergmaterialets deformations-, hållfasthets-, sprickbildnings- och friktionsegenskaper beror på dess mikrostruktur, sammansättning och omvandlingsgrad. När det gäller sprickgeometrin har den sammansatta spricktopografin, som består av sprickytornas ojämnheter, graden av passning och fyllnadsmaterial, en direkt inverkan på sprickornas egenskaper.

När en spricka utsätts för skjuvning kan olika lokala deformationsmekanismer äga rum på olika storleksskalor. Effekten av sprickans storlek på skjuvmotståndet har tidigare observerats och studerats i laboratorie- och *in situ*-experiment. Den allmänna observationen är att den högsta skjuvspänningen minskar men att den tillhörande skjuvförskjutningen ökar, med ökande sprickstorlek för naturliga bergsprickor (Bandis et al. 1981). Ökad skjuvstyrka med ökande sprickstorlek eller ingen storlekseffekt har dock också rapporterats av andra, se till exempel översikten i Bahaaddini et al. (2014). Vidare har det föreslagits att graden av sprickpassning i kombination med provstorleken spelar en styrande roll för den maximala skjuvstyrkan (Johansson 2016). På stora djup är bergmassans styvhet hög och måste beaktas vid skjuvning av sprickor. För att experimentellt simulera inverkan av bergmassans styvhet vid skjuvning av sprickor på stora djup genomförs direkta skjuvförsök med normalspänningsvillkoret constant

normal stiffness (CNS). Det innebär att normalspänningen ökar proportionellt mot dilatansen, dvs. förändringen av sprickvidden när en spricka försöker öppna sig (dilatera) under skjuvning. Vid sprickor på mindre djup är bergmassans styvhet är låg och normalspänningen förändras försumbart vid en dilaterande spricka. Man brukar då anta att normalspänningen är konstant och kallar detta normalspänningsvillkor för CNL (constant normal load).

Hittills har få undersökningar genomförts av storlekseffekter under CNS-belastningsförhållanden. Dessutom saknas kunskap kring skjuvbeteendet hos sprickor i hårt berg som utsätts för en normalspänning på 5 till 10 MPa (vilket motsvarar spänningstillståndet vid ett djup på flera hundra meter) under både CNL- och CNS-belastningsförhållanden. Den senaste utvecklingen inom karakteriseringstekniker har ökat möjligheterna att få en korrekt beskrivning av spricktopografin, före och efter mekanisk provning, med hjälp av högupplöst optisk skanning av brottytorna. Genom detta projekt har det nu också blivit möjligt att mäta normal- och skjuvförskjutningarna i sprickplanet via lokala förskjutningsgivare baserade på optisk mätning genom Digital Image Correlation (DIC), och att använda höghållfast betong i replikor av sprickor. Sammantaget öppnar det möjligheten att generera en uppsättning data som är bredare och mer komplett än de data som finns tillgängliga idag.

2 Översikt av POST-projektet

2.1 Tidigare resultat och rekommendationer - POST-projektet, fas 1 (2014–2016)

Motivet bakom POST-projektet var att kunskapen var dålig om de mekaniska egenskaperna hos stora bergsprickor stora djup och att kunna visa att en 50 mm skjuvning av befintliga sprickor i ett kärnavfallsförvar på ett djup av cirka 450 m i kristallin bergmassa är extremt osannolik. Flera *in situ*-experiment vid Äspö HRL i Sverige och ONKALO i Finland planerades, designades och studerades via datorsimuleringar (Mas Ivars et al. 2015; Valli & Hakala 2016). PUSH-testet, som var ett *in situ*-skjuvförsök med ett CNS-randvillkor, genomfördes tillsammans med bakåtberäkningar (Valli et al. 2016). Man såg att skjuvmotståndet ökade som en effekt av de grova och råa sprickytorna i kombination med en skjuvningsinducerad dilatans. Resultaten demonstrerade vikten av att karakterisera sprickornas geometri och inkludera effekten av bergmassans styvhet genom CNS-belastningsvillkoret. De andra *in situ*-experimenten realiserades inte på grund av den experimentella komplexiteten, osäkerheten och höga kostnader. Småskaliga direkta skjuvningförsök utfördes på prover med Breccia- och kalcitfyllda sprickor (100×100 mm) under CNL- och CNS-förhållanden. Effekten av de mjuka fyllnadsmaterialen i sprickorna var att ingen skjuvinducerad dilatans inträffade i experimenten. Därför blev det ingen skillnad i resultaten mellan experimenten utförda med CNL- och CNS-belastningsvillkor. Mätningar av kontakttrycksfördelningen i sprickorna gjordes före skjuvning (Jacobsson 2016). Ytor av naturliga sprickor skannades med hjälp av 3D-fotogrammetri, vilket gav punktmoln som användes för att skapa realistiska modeller för att simulera skjuv-

beteendet. Simuleringar visade att skjuvmotståndet berodde kraftigt på normalstyvheten i bergmassan. Detta är i linje med resultaten från PUSH-testet och från småskaliga laboratorieexperiment som rapporterats i litteraturen, t.ex. Jiang et al. (2004).

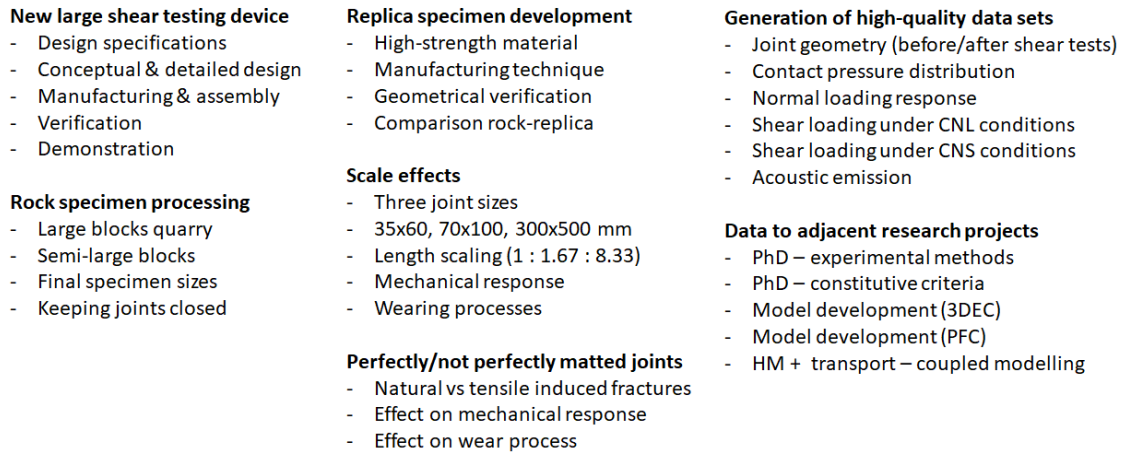
Från projektet lämnades rekommendationer för fortsatt arbete. Det visade sig att det finns flera utmaningar med *in situ*-försök, bland annat att hitta lämpliga representativa sprickor, svårigheter att genomföra experimenten, stora osäkerheter i experimenten och höga kostnader. För att minimera experimentella osäkerheter och vara mer kostnadseffektiv är det bättre att genomföra undersökningar stora sprickor genom provningar under kontrollerade laboratorieförhållanden. En av prediktionsosäkerheterna är att det saknas resultat från skjuvförsök för större bergsprickor under representativa och realistiska normalspänningsförhållanden (som kan erhållas under CNS-belastningsvillkor) för att bättre förstå effekterna av sprickornas storlek och kunna inkludera dessa i modellerna. Det rekommenderades därför att utveckla en laboratorieutrustning för att kunna genomföra direkta skjuvförsök på stora sprickor med möjlighet att skjuva upp till 50 mm och en normalspänning på upp till 10 MPa under CNS-förhållanden. Det rekommenderades också att utveckla en metodik för att replikera sprickor för att kunna studera olika belastningsförhållanden på prover med identiska brottytor och vid olika sprickstorlekar (Siren et al. 2017).

2.2 Beskrivning av POST-projektet, fas 2 (2017–2024)

Den andra fasen av POST-projektet initierades 2017 av SKB och NWMO och det experimentella arbetet genomfördes på RISE i Borås och avslutades 2023 med efterföljande analys- och rapporteringsarbete (Flansbjer et al. 2024; Jacobsson et al. 2024a,b,c; Pérez Rey et al. 2024). Det främsta motivet för detta projekt var att genomföra laboratorieexperiment med hög kvalitet genom direkta skjuvförsök på stora bergsprickor. De två huvudmålen för den andra fasen var: (1) utveckling av en laboratorieutrustning för att utföra välkontrollerade experiment på stora prover med bergsprickor och deras replikor vid relativt stora normalspänningar under CNL- och CNS-förhållanden och upp till 50 mm skjuvförskjutning; och (2) generera en unik uppsättning, väldokumenterade laboratoriedata med god kvalitet av geometrier och mekaniska beteenden hos bergsprickor och deras replikor. Den genererade datamängden kommer att ligga till grund för: (a) att öka den grundläggande förståelsen för det mekaniska beteendet hos bergsprickor i flera aspekter, t.ex. beteende hos stora bergsprickor, storlekseffekter, korrelation med sprickgeometri, nötning av sprickytor, effekten av CNS- kontra CNL-förhållanden, etc.; b) Förbättring av befintliga konstitutiva modeller eller utveckling av nya, och (c) vidareutveckla och validera detaljerade numeriska modeller för simulering av sprickbeteende.

Projektet består av flera delar där många av dem är nya bidrag, till exempel att utveckla en skjuvprovningsmaskin för upp till 400×600 mm stora prover (maxstorlek används inte fullt ut här), och att extrahera och tillverka bergprover innehållande naturliga och draginducerade sprickor med tre olika sprickstorlekar. Med dessa prover studerades

effekten av imperfekt passade naturliga, kontra perfekt passade färska sprickor på det mekaniska beteendet. Replikor av naturliga bergsprickor tillverkades av ett material med en hållfasthet jämförbar med granit för parameterstudier på samma sprickgeometri. Dessutom 3D-skannades alla sprickytor att före och efter den mekaniska provningen, kontakttrycksfördelningen mättes och akustiska emissionsmätningar utfördes under skjuvförsöken. En översikt över de olika delarna i projektet visas i figur 1 inklusive närliggande projekt. Delarna beskrivs mer detaljerat i efterföljande avsnitt.



Figur 1. Översikt över projektinnehåll i fas 2.

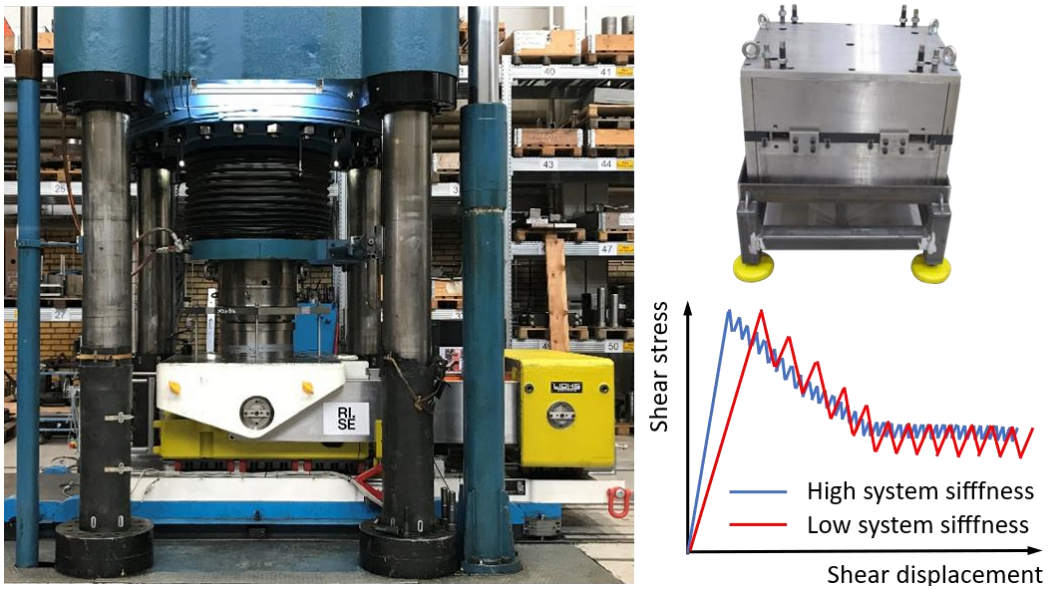
3 Experimentellt program

3.1 Utveckling av utrustning för mekanisk provning av stora sprickor

En inventering av befintlig laboratorieutrustning i världen genomfördes under det inledande POST-projektet och man fann att det inte fanns någon lämplig laboratorie-utrustning med de efterfrågade specifikationerna avseende provstorlek, krafter, och med möjlighet att genomföra direkta skjuvförsök under CNS-villkor. Den nya utrustningen byggde på att utnyttja en befintlig 20 MN fyrpelarmaskin hos RISE i Borås, jfr. (Siren et al. 2017). En största provstorlek på 400×600 mm valdes för att effektivt kunna ta ut stora prover från tunnlar genom att borra kärnor upp till 300–400 mm i diameter med konventionell borrutrustning med sprickans plan centrerat i kärnan (Jacobsson 2016). Ett alternativt tillvägagångssätt skulle vara en mer kostsam vajersågning av de bergblock som krävs.

Utvecklingen av utrustningen, de experimentella procedurerna samt provningen utfördes huvudsakligen på RISE i samarbete med SKB, NWMO och KTH. En bild av utrustningen visas i figur 2. Enligt ISRM:s rekommendationer är en hög systemstyvhet (som ger små deformationer i provuppställningen) en viktig konstruktionsparameter (Muralha et al. 2014). Detta är viktigt för styrbarheten av förskjutningen i skjuvrikt-ningen (figur 2). Utrustningen är dimensionerad för belastningar upp till 5 MN i både normal- och skjuvriktning, vilket motsvarar en högsta spänning på 20,8 MPa vid största

provstorlek. För att hålla behålla bergsprickorna ostörda under fastgjutningen av prover i provhållarna och vid monteringen av provhållare i skjuvboxarna används precisionstillverkade provhållare och skjuvboxar och användning av ett system för exakt positionering av provhållarna relativt varandra under dessa steg (figur 2).



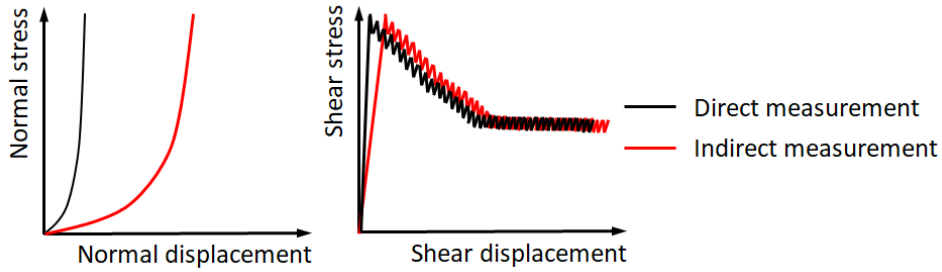
Figur 2. Vänster: Ny skjuvprovningsutrustning; Höger: (1) Tillhörande provhållare, (2) Schematisk bild av skjuvspänning mot skjuvförskjutning med låg och hög systemstyvhet.

3.2 Utveckling av provningsmetodik och mätmetoder för direkta skjuvförsök

Ett viktigt forskningbidrag var uvecklingen av ett optiskt mätsystem, baserat på DIC, för direkta mätningar av sprickförskjutningarna i både normal- och skjuvriktningarna med avsevärt minde mätfel. Direkta mätningar av förskjutningar görs tvärs över sprickorna under både normalbelastningsförsöken och skjuvprovningen. Mätsystemet implementerades i bägge skjuvprovningsutrustningarna, den befintliga för små/mellanstora och den nya för stora prover. Mätsystemet är inspirerat av ett tidigare system som utvecklades på SP för direkta lokala mätningar av normaldeformationen tvärs över en spricka under normalbelastningsförsöken (Jacobsson & Flansbjer 2005) och användning av DIC i andra sammanhang (Jacobsson & Brander 2025) Vanligen mäts sprickornas deformationer som den relativa förskjutningen mellan skjuvboxarna som är en indirekt mätning. I denna mätning inkluderas bidrag från deformationer i ingjutningsmaterial och i maskinen och man får därför större deformationsvärden och ett mätfel. Försök har gjorts tidigare för att kompensera för bidragen från ingjutningsmaterialet och maskinen men kompenstationen ger stora osäkerheter. Betydelsen är med direkta mätningar uppenbar vid bestämning av bergsprickors normal- och skjuvstyvhet, se figur 3.

En metod att förbättra noggrannheten av styrningen av normalspänningen vid CNS-belastningsvillkor utvecklades (Larsson J & Flansbjer 2020). Mätningar utfördes på stålprov för att bestämma systemens normalstyvheter i skjuvprovningsutrustningarna.

Resultaten används för att kompensera för systemdeformationerna under skjuvförsök under CNS-förhållanden. Denna typ av kompensation är ny och har aldrig gjorts tidigare i laboratorieförsök. Slutligen kan nämnas att akustiska emissionsmätningar med lokaliseringsbestämning av de mikroseismiska eventen genomfördes under skjuv-försöken liknande i Moradian Z, et al. (2012). En anpassning gjordes för att kunna placera sensorer runt om sprickorna för de små och mellanstora proverna.



Figur 3. Schematisk bild av indirekta och direkta mätningar av sprickans normal- och skjuvdeformationer.

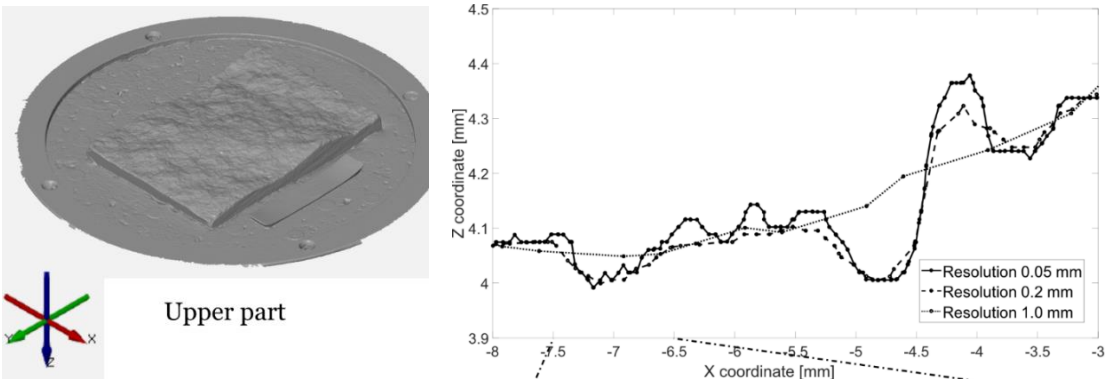
3.3 Prover med naturliga bergsprickor och draginducerade sprickor och replikor

Bergmaterialet till försöken är medelkornig granit från Flivik stenbrott utanför Oskars-hamn (figur 4). Detta stenbrott valdes på grund av kunskap från tidigare forsknings-projekt (Johansson 2016; Jacobsson & Brander 2025). Granit från stenbrott har vanligtvis tre huvudsakliga klyvplan, svall, klyv och borst med ökande svårighet att klyva bergmaterialet (Nadan & Engelder 2009). Två huvudblock, 15,2 och 19,6 ton som innehöll ett naturligt sprickplan. Från dessa block tillverkades prover med naturliga sprickor och draginducerade sprickor i materialets klyv-riktning i tre storlekar 35×60 mm, 70×100 mm och 300×500 mm. Sprickorna hölls stängda och ostörda under provbearbetningen.

Figur 4. Vänster: Plats där blocken togs ut. De röda linjerna visar plan med horison-tella exfolieringssprickor. Höger: Prov i storleken 300×500×350 mm med naturliga sprickor som är fixerat för att hålla sprickorna i ursprungsläge under transport.

Replikor av naturliga bergsprickor i mellanskala (70×100 mm) tillverkades av en ultrahöghållfast betong med en materialstyvhet och styrka jämförbar med graniten. Avgjutningar i silikongummi av naturliga bergsprickor användes som form vid tillverkning av replikaproverna. Två typer av replikor gjordes, (1) kopior av bägge ursprungliga sprickytorna, (2) kopia av ena spricksidan och sedan användes den kopierade sidan för att tillverka andra sidan som gav en perfekt passning. De geometriska avvikelserna mot de ursprungliga bergsprickorna bestämdes genom skanning och för att successivt förbättra tillverkningsprocessen (Larsson et al. 2023a,b)]. Exakt replikering av de fina sprickgeometrierna är mycket viktigt för att efterlikna det mekaniska beteendet hos de ursprungliga avbildade bergsprickorna.

Alla sprickytor skannades före och efter provningarna med hjälp av en 3D-skanner. Figur 5 visar en skannad sprickyta och dess topografi längs en linje över sprickan. Bilden visar upplösningen av topografin för olika punkttätheter. Ett genomsnittligt punktavstånd på 0,2 mm valdes för det genererade punktmolnet för att begränsa datamängden. Ytorna är också fotograferade, bilderna efter provning visar nötningszonerna. Kontakttrycksfördelningen mättes med en tryckkänslig film på samma sätt som i Jacobsson (2016). Kontakttrycksdata för sprickreplikorna t.ex. jämföras med kontakttrycksdata för de ursprungliga bergsprickorna, förutom jämförelserna av geometridata, för att kontrollera hur sprickytorna matchar varandra.



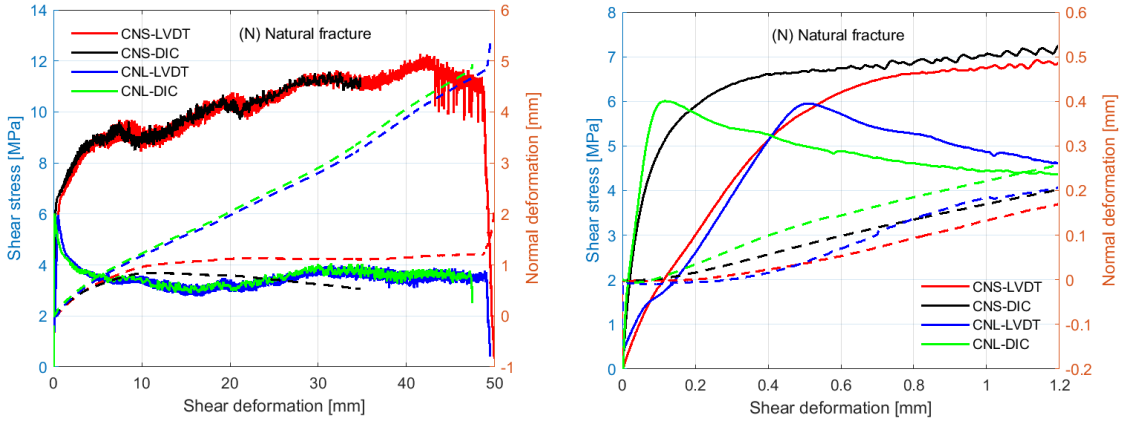
Figur 5. Vänster: Skannat prov inklusive provhållare. Höger: Höjdkoordinat (z) längs en linje på en naturlig sprickyta för olika punkttätheter. [Larsson et al. 2023a]

3.5 Normalbelastnings och skjuvförsök på prover med bergsprickor och replikor

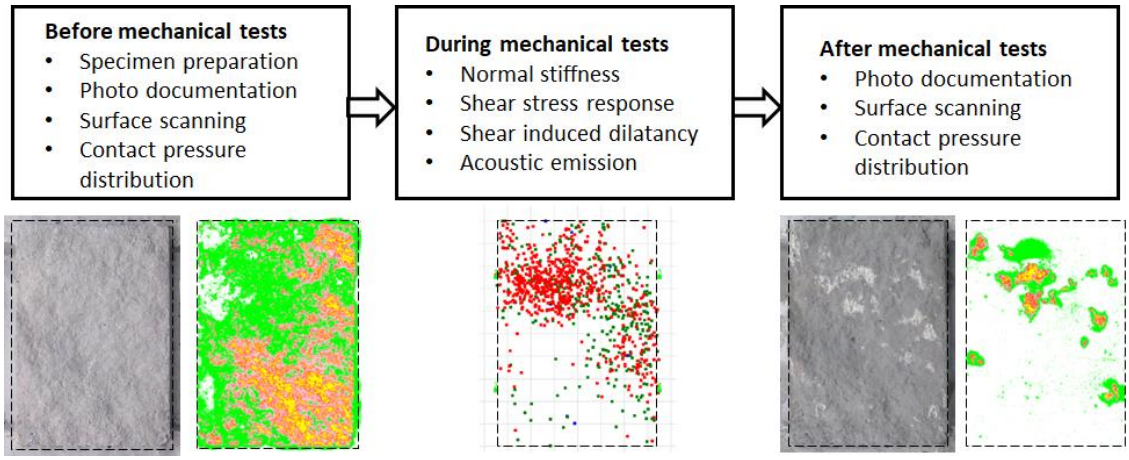
Normalbelastnings- och skjuvförsök gjordes på prover med naturliga samt draginducerade bergsprickor i de tre olika storlekarna, samt replikaprover i en storlek. Totalt genomfördes 64 prover. Resultaten visar att normal- och skjuvstyvheten ger en mycket högre normalstyvhet vid direkt deformationsmätning jämfört med indirekt mätning. I figur 6 visas resultat från direkta skjuvförsök på två 300×500 mm prover med naturliga sprickor. Resultaten visar tydliga skillnader mellan indirekt (LVDT) och direkt deformationsmätning (DIC). Man kan också tydligt se förstärkningseffekten som omgivande bergmassans styvhet ger på skjuvstyrkan när CNL-villkor används vid provningen.

3.6 Översikt över provningsplan, arbetsflöde och integrerade mätningar

En översikt av arbetsflödet och de olika mätningarna som har gjorts innan, under och efter de mekaniska provningarna visas i figur 7. Figuren illustrerar också hur mätresultat kan användas för att samtolkas. I detta fall visas fotografier av sprickytan från ett 70×100 mm prov före och efter provning. Efter provning kan man se var kontakter och nötning har skett under provningen. Kontaktrycksmätningarna visar fördelningen innan provningen och efter provningen. Resultaten från de AE-mätningarna visar kontakter under skjuvprovningen. Dessa mätningar är de enda som kan ge information om kontakter mellan sprickplanen på olika ställen inne sprickan under skjuvprovning.

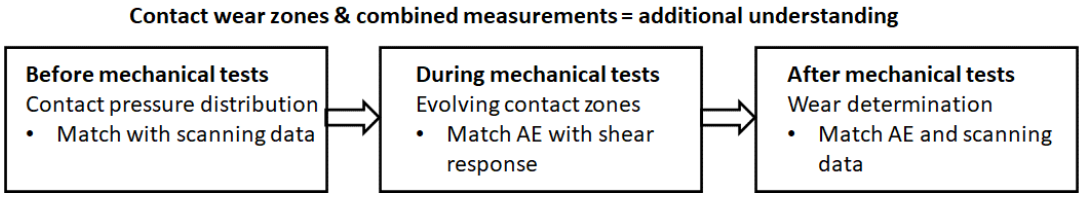


Figur 6. Skjuvspänning och normalförskjutning (dilatans) mot skjuvförskjutning för CNS- och CNL-prover. Heldragna linjer visar skjuvspänningar och streckade linjer normalförskjutning. Vänster: fullskala; Höger: närbild på det elastiska området. Observera att diagrammen har olika skalor. [Jacobsson et al. 2024a]



Figur 7. Beskrivning av arbetsflöde och mätningar. Nedre rad: Foto av sprickyta och kontakttrycks-fördelning innan mekanisk provning (vänster), lokaliserade mikroseismiska events under skjuvprovning (mitten) och foto av sprickyta och kontakttrycksfördelning efter mekanisk provning (höger).

Syntesen av de olika mät- och tolkningsstegen för att studera kontaktnötningszoner beskrivs i figur 8 som ett exempel på de integrerade mätningarna.



Figur 8. Integrerade mät- och tolkningssteg för att studera kontaktnötningszoner.

4 Diskussion och framtida arbete

I maj 2013 anordnade Posiva en workshop Olkiluoto, Finland tillsammans SKB och NWMO med inbjudna experter bland de egna organisationerna, konsulter och andra internationella experter inom bergmekanik och hydrogeologi för att diskutera hur man kan bättre förstå egenskaper hos stora bergsprickor i ett kärnbränsleförvar. SP (Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, nu RISE) presenterade en möjlighet att genomföra stora skjuvförsök i 20 MN utrustningen i Borås. Idén hade diskuterats några år tidigare med KTH. Nu 13 år senare har idén realiserats och ny fundamental kunskap om stora bergsprickor har tagits fram. För att kunna sätta adekvata krav och få med alla kritiska funktioner i en ny provningsutrustning har mångårig erfarenhet från mekanisk provning av bergsprickor (Jacobsson et al. 2012) och mätteknik (t.ex. Jacobsson & Flansbjer 2005; Jacobsson & Brander 2025) utnyttjas. Vid utformningen av provningsprogrammet har tidigare kunskap kring effekt av passning, och storlekseffekter av bergsprickor t.ex. Johansson (2016) använts.

Bergprover har framgångsrikt tillverkats med både naturliga tighta ostörda sprickor med liten vittring och draginducerade sprickor, med en spårbarhet till hur de har tagits ut ur blocken. En tillverkningsprocess för att producera högkvalitativa kopior av sprickor med ett material med en styrka och styvhet jämförbar med hårt berg utvecklades som möjliggör kontrollerade parameterstudier. Inverkan av avvikelser mellan verklig sprickgeometri och replikor studerades och visade på stor känslighet på skjuvresponsen. Såvitt författarna känner till har inga tidigare studier av tillverkning av bergsprickor från liknande höghållfasta material hittats, förutom i Olsson (1998) som studerade de hydrauliska egenskaperna i sprickor, men inte under skjuvbelastning.

Den nya skjuvprovningsutrustningen har uppfyllt alla specifikationer som sattes och resultaten från provningarna är unika då inga liknande resultat på stora sprickor har producerats tidigare. Under projektets gång infördes optiska deformationsmätningar för att möjliggöra direkta deformationsmätningar under både normalbelastnings- och skjuv-försöken. Förutom noggrannare bestämningar av sprickstyvheter har de mer noggranna mätningarna har även bidragit till en helt ny förståelse av deformationsförloppet under skjuvförsöken. Resultaten kan användas för att jämföra med noggranna numeriska

simuleringar av aktuell spricka. Akustiska emissionsmätningar genomfördes och är en av de få metoder som gör det möjligt att övervaka utvecklingen av kontakterna över sprickytan under skjuvningen. Resultaten av den akustiska emissionen ger information om nötningsintensiteten och återstår att analysera. En samanalys av resultat från de direkta skjuvförsöken på bergproverna har påbörjats för att se på vilken effekt storleken på en spricka har på de mekaniska egenskaperna. Resultaten visar att sprickans storlek inte har någon betydelse för när en skjuvrörelse (glidning) startar i en spricka (Larsson et al. 2025). Det återstår att studera om det finns ett beroende av sprickornas storlek på högsta skjuvspänningen. En studie har även gjorts för att undersöka storleksberoende på skjuvstyvheten (Larsson et al. 2026).

Projektet har genererat data som har stött fem parallella projekt: (1) Doktorandprojekt vid RISE och KTH med utveckling av experimentella metoder, dvs. replikautveckling och validering samt analys av effekter av sprickornas olika storlekar observerade från mekaniska försök; (2) ett annat doktorandprojekt vid KTH om förbättring av konstitutiva modeller för bergsprickor; (3) ett projekt vid Itasca med stöd av NWMO för att förbättra numeriska simuleringar av skjuvningsbeteende hos sprickor med hjälp av 3DEC; (4) ett projekt vid KTH finansierat av BeFo och SKB för att förbättra numerisk simulering av skjuvbeteende med PFC; och (5) ett projekt vid KTH finansierat av SKB om hydromekanisk (HM) kopplad modellering. Doktorandprojektet vid RISE och KTH med utveckling av experimentella metoder bör särskilt nämnas då det skapades parallellt med POST-projektet med finansiering från BeFo (BeFo 235) och SKB för att kunna göra fördjupade analyser och kompletterande provningar. Projektet resulterade i en doktorsavhandling, Larsson (2025).

Framtida arbete är att fortsätta att analysera befintliga data och kunna göra samtolkningar av resultat i nya projekt. Ett modelleringsarbete är redan påbörjat via ett pågående BeFo-finansierat projekt. Nästa stora undersökningssteg är att göra hydromekaniska studier för att se hur transmissiviteten genom sprickor påverkas av mekaniska belastningar.

5 Slutsatser

SKB, Posiva och NWMO såg ett problem framför sig att lösa angående förbättrade prediktioner av skjuvförskjutningar och misstankar om att gängse kunskap och modeller för bergsprickor inte stämde och ville se på problemet med fräscha ögon. De har haft en uthållighet och beredda att investera i kunskapsframtagning som har via *in situ*-experiment och modellering, gått vidare till att bygga upp ny kunskap via välkontrollerade laboratorieprovningar. Nu med nästan hela facit i hand kan man med säkerhet säga att investeringen har lönat sig. Genomförandet av det experimentella programmet har gett helt ny kunskap om bergsprickor och gett experimentella bevis för tidigare resultat framtagna i numeriska studier. Mycket data återstår fortfarande att analysera och projektet har också gett kunskap om hur man kan ta ytterligare steg och vilka frågor som man bör ställa i framtida projekt. Framgångsfaktorer har varit ett bra formulerat

problem, mod att ifrågasätta gängse sanningar, uthållighet och beredda att göra nödvändiga investeringar, utnyttja expertkunskaper och uppväxling med ytterligare finansiering som har möjliggjort en doktorand att fördjupa sig i ämnet. Projektet är av grundforskningskaraktär och har stor inverkan på den allmänna kunskapsuppbyggnaden kring mekaniskt beteende hos stora sprickor som är viktigt för flertal bergmekaniska frågeställningar.

Tackord

Det här projektet skulle inte ha startat eller tagit fart i den givna riktningen utan det arbete som utförts i fas 1 av POST-projektet. Tack till Posiva OY och medlemmarna i POST-projektet och dess internationella experter. Ett särskilt tack till Rolf Christianson som hjälpte till att bana väg för den andra fasen av POST-projektet. Huvuddelen av projektet har finansierats av SKB och NWMO. Tack till BeFo (Stiftelsen Bergteknisk Forskning) som har bidragit med finansiering för doktorandprojektet med fokus på en del av det experimentella arbetet och analyserna. RISE har bidragit med finansiering för utveckling av experimentella procedurer inklusive AE-mätningar. Tack också till de projektmedlemmar på RISE som har bidragit till projektet och biträdande professor Ignacio Pérez Rey, Vigo universitet, som var gästforskare på KTH under ett år i slutet av projektet och bidrog med sammanställningen av sammanfattningsrapporten och en del analyser.

Referenser

Bahaaddini M, Hagan P, Mitra R, Hebblewhite B 2014 Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study. *Eng. geol.* 181:212–23

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.* 18:1–21

Flansbjer M, Williams Portal N, Larsson J, Jacobsson L, Hanquist C, 2024. Parametrization of Structures 2 – Normal loading and direct shear tests on intermediate size on high-strength replicas of a natural rock fracture in laboratory. RISE rapport 2024:28, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås, Sweden (ej publ.)

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, Brander L 2025 Tensile Fracture Initiation and Propagation of Granite and Gneiss at Wedge Splitting Tests: Part 2—Fracturing Studies Based on Digital Image Correlation and Thin Section Analysis. *Rock. Mech. Rock. Eng.* 58:2031–54

Jacobsson L and Flansbjer M 2005 Borehole KFM05A. Normal stress test with direct and indirect deformation measurement together with shear tests on joints. Forsmark site investigation, SKB P-05-141, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden

Jacobsson L, Larsson J, Flansbjer M, Hanquist C 2024a Parametrization of Structures 2 – Normal loading and direct shear tests on large natural and tensile induced rock

fractures in laboratory, RISE rapport 2024:30, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås, Sweden (ej publ.)

Jacobsson L, Larsson J, Flansbjer M, Hanquist C 2024b Parametrization of Structures 2 – Normal loading and direct shear tests on small and intermediate size natural and tensile induced rock fractures in laboratory. RISE rapport 2024:29, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås, Sweden (ej publ.)

Jacobsson L, Larsson J, Williams Portal N 2024c Parametrization of Structures 2 – Extraction of rock specimens with natural and tensile induced fractures from quarried granite blocks. RISE rapport 2024:27, RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås, Sweden (ej publ.)

Jiang Y, Xiao J, Tanabashi Y, Mizokami T 2004 Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41:275–86

Johansson F 2016 Influence of scale and matedness on the peak shear strength of fresh, unweathered rock joints *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 82:36–47

Larsson J 2025 Approaches for increased accuracy in laboratory direct shear testing, Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, TRITA-ABE-DLT, 251.

Larsson J, Flansbjer M 2020 An Approach to Compensate for the Influence of the System Normal Stiffness in CNS Direct Shear Tests. *Rock. Mech. Rock. Eng.* 53:2185–99

Larsson J, Flansbjer M, Jacobsson L, Johansson F, Johnson E, Mas Ivars D 2026 An experimental study on the shear stiffness of rock joints based on direct displacement measurements. *Under granskning hos Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.*

Larsson J, Flansbjer M, Jacobsson L, Johansson F, Johnson E, Mas Ivars D, Pérez-Rey I 2025 A three-factor experimental study on the effect of specimen size on the shear strength of rock joints. *Rock Mech. Rock Eng.*

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. and Geotech. Eng.* 15(9):2193–2208

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. and Geotech. Eng*. 15(9):2209–23

Mas Ivars D, Lope Àlvarez D, Sánchez Juncal A, Ghazal R, Damjanac B 2015 Parametrisation of Fractures - Estimation of Fracture Shear Displacement due to Excavation of New Slots at The TASQ Tunnel via Numerical Modeling, Workreport 2015-28, Posiva OY, Eurajoki, Finland

Moradian Z, Ballivy G, Rivard P 2012 Correlating acoustic emission sources with damaged zones during direct shear test of rock joints. *Can. Geotech. J.* 49:710–8

Muralha J, Grasselli G, Tatone B, Blümel M, Chryssanthakis P and Yujing J 2014 ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version *Rock. Mech. Rock. Eng.* 47:291–302

Nadan B J, Engelder T 2009 Microcracks in New England granitoids: A record of thermoelastic relaxation during exhumation of intracontinental crust. *Geol. Soc. Am. Bull.* 121:80–99

Olsson R 1998 Mechanical and Hydromechanical Behaviour of Hard Rock Joints. A laboratory study. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

Pérez Rey I, Johansson F, Mas Ivars D, Kasani H A, Larsson J, Jacobsson L, Flansbjer M 2024, Fracture parameterisation for repository design and post-closure analysis (Post), phase 2, 3 and 4 - Final Report, SKB Report R-24-10, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.

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

SKB 2011 Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm

Valli J, Hakala M 2016 Parametrisation of Fractures - Model Generation Methodology and Prediction Calculations, Workreport 2016-32, Posiva OY, Eurajoki, Finland

Valli J, Hakala M, Suikkanen J, Mattila J, Heine J, Simelius C 2016 Parametrisation of Fractures – PUSH Test Execution and Back-Analysis, Workreport 2016-52, Posiva OY, Eurajoki, Finland