

SKJUVNING AV BERGSSPRICKOR – NYA RÖN FRÅN EN EXPERIMENTELL STUDIE

SHEARING OF ROCK JOINTS – NEW FINDINGS FROM AN EXPERIMENTAL STUDY

Jörgen Larsson, RISE Research Institutes of Sweden

Mathias Flansbjer, RISE Research Institutes of Sweden

Lars Jacobsson, RISE Research Institutes of Sweden

Fredrik Johansson, KTH Kungliga Tekniska Högskolan

Erland Johnson, RISE Research Institutes of Sweden

Diego Mas Ivars, SKB Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

Skjuvning av bergssprickor är en kritisk felmod som i många fall därför avgör vilken belastning en berganläggning kan motstå. De skjuvmekaniska egenskaperna predikteras genom tillämpning av teoretiska modeller i kombination med data från skjuvförsök. En omdiskuterad frågeställning är om, och i så fall hur, storleken på sprickytan inverkar på de skjuvmekaniska parametrarna, den så kallade skaleffekten. I denna artikel presenteras nya rön från en omfattande experimentell studie där skaleffekten av två viktiga skjuvmekaniska parametrar studerats: skjuvhållfasthet och skjuvstyvhet. Genom att ha utfört flera skjuvförsök för varje parameterkombination, på unika provkroppar för samma material (granit), och i kontrollerad laboratoriemiljö, har osäkerheterna reducerats. Vidare har kunskapen breddats genom att försöken utförts under ej tidigare studerade kombinationer av normalspänning (5 MPa) och sprickstorlekar (21 cm² till 1500 cm²), under randvillkoren konstant normalspänning och konstant normalstyvhet, för både naturliga och spänningsinducerade sprickor. Nya fysikaliskt baserade definitioner för skjuvhållfasthet och skjuvstyvhet presenteras tillsammans med metoder för att fastställa dessa parametrar enligt definitionerna. Vidare diskuteras effekten på skjuvstyvheten av att mäta sprickans skjuvning konventionellt med förskjutningsgivare mellan skjuvboxarna och med optik direkt över sprickan. Slutligen undersöks effekten av sprickstorlek, randvillkor och spricktyp på både skjuvhållfasthet och skjuvstyvhet statistiskt med variansanalys.

Nyckelord: bergsspricka, direkt skjuvtest, skaleffekt, skjuvhållfasthet, skjuvstyvhet, variansanalys (ANOVA)

Summary

Shearing of rock joints is a critical failure mode that in many cases determines the load-bearing capacity of an underground structure. The shear-mechanical properties are predicted through the application of theoretical models combined with data from shear tests. A debated question is whether, and if so how, the size of the joint surface affects the shear-mechanical parameters—the so-called scale effect. This article presents new findings from an extensive experimental study in which the scale effect of two important shear-mechanical parameters has been investigated: shear strength and shear stiffness. By performing multiple shear tests for each parameter combination, on unique specimens of the same material (granite), and under controlled laboratory conditions, uncertainties have been reduced. Furthermore, knowledge has been broadened by conducting tests under previously unstudied combinations of normal stress (5 MPa) and joint sizes (21 cm² to 1500 cm²), under the boundary conditions of constant normal stress and constant normal stiffness, for both natural and tensile stress-induced joints. New physically based definitions of shear strength and shear stiffness are presented together with methods for determining these parameters according to the definitions. In addition, the effect on shear stiffness when measuring joint shear displacement conventionally with displacement sensors between shear boxes versus using optical measurements directly across the joint is discussed. Finally, the effects of joint size, boundary conditions, and joint type on both shear strength and shear stiffness are statistically examined using analysis of variance.

Keywords: analysis of variance (ANOVA), direct shear test, rock joint, scale effect, shear stiffness, shear strength

1 Inledning

Skjuvning av bergsprickor är ett kritiskt brottförlopp i bergmassor. Följaktligen måste förekomsten av bergsprickor beaktas vid utformningen av konstruktioner som grundläggs på berg, såsom dammfundament, eller som byggs i berg, såsom tunnlar och berggrum. Kunskap om skjuvningsprocessen och de mekaniska egenskaperna hos bergsprickor är därför grundläggande för prediktion av den lastbärande kapaciteten. Med ökad kunskap om bergsprickors lastbärande kapacitet följer ökad byggnadseffektivitet, minskad negativ miljöpåverkan, säkrare urbana transportsystem och robustare infrastruktur. Dessutom förbättras arbetsmiljön under både byggskede och drift tack vare bättre kontroll på säkerhetsmarginalerna.

Teoretiska modeller, exempelvis Patton (1966); Clough et al. (1969); Barton (1973); Bandis et al. (1983); Grasselli et al. (2003); Ríos-Bayona et al. (2021) och Wu et al. (2022), används vid beräkning av bärförmågan. Både utvecklingen och valideringen av dessa modeller baseras på tester av bergprover. Följaktligen kan inte de teoretiska

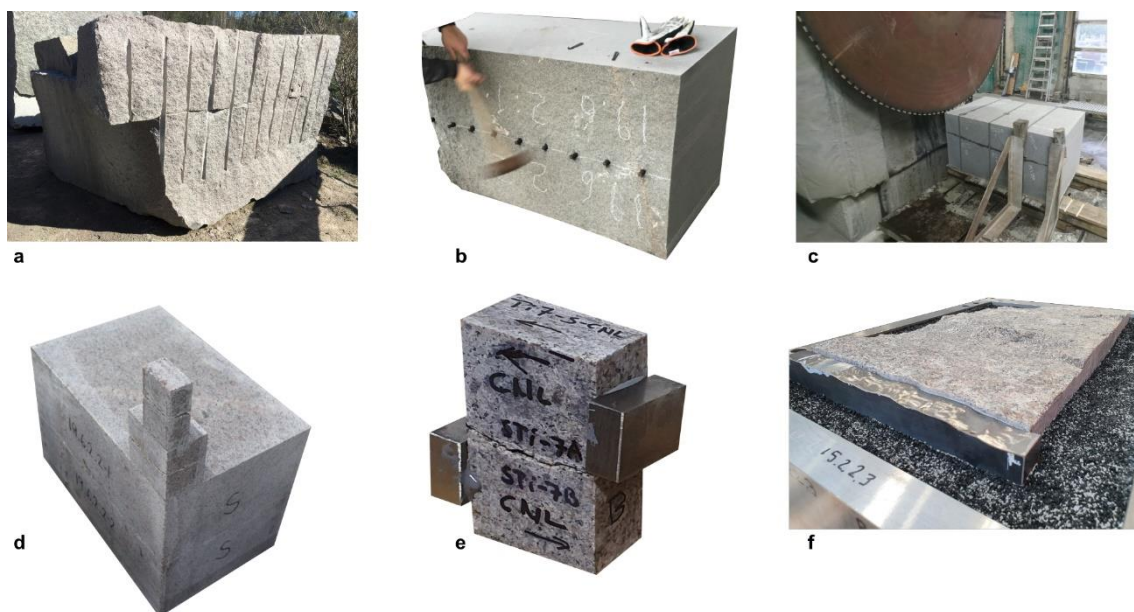
modellerna bli mer precisa än noggrannheten i testresultaten. Kvaliteten på testresultaten är således av grundläggande betydelse. I denna artikel presenteras nya rön av vikt för både gällande dimensioneringspraxis och för utvecklandet av nya teoretiska modeller kopplat till två viktiga skjuvmekaniska parametrar: skjuvhållfasthet och skjuvstyvhet. Framtagandet av de nya rönen har möjliggjorts genom resultaten från ett kunskapsutvidgande och unikt experimentellt program (Jacobsson et al. 2021).

2 Metodik

Bergsprickor i granit av tre storlekar, 35 mm × 60 mm (S), 70 mm × 100 mm (M) och 300 mm × 500 mm (L) användes i direkta skjuvtester under kontrollerade laborieförhållanden. Totalt genomfördes fyrtiosex tester på ostörda naturliga sprickor (N), med en liten mängd utfyllnadsmaterial (kalcit) och begränsad vittring, samt på artificiellt dragspänningsinducerade (färska och välpassande) sprickor (TI). Proven testades under randvillkoren kontakt normalspänning, CNL, och konstant normalstyvhet, CNS. Randvillkoret CNL gäller exempelvis för släntstabilitetsproblem, då bergmassan glider under inverkan av sin egen tyngd. CNS gäller vid underjordiska utgrävningar när styvheten hos den omgivande bergmassan begränsar sprickans dilatation under skjuvning (Haberfield et al. 2003). Figur 1 illustrerar provprepareringsprocessen. Programmet utgjordes av tre experimentella faktorer: spricktyp (N och TI), randvillkor (CNL och CNS) och provstorlek (S, M och L) För samtliga kombinationer av de experimentella faktorerna utfördes mellan tre och sex tester på unika provkroppar, förutom för N-CNL-L, där ett test genomfördes.

Fujifilms tryckmättningsfilm Prescale av typ LW (två ark, vardera med en ungefärlig tjocklek på 90 µm) användes för att avbilda bergsprickornas kontaktområden före de direkta skjuvtesterna. Kontaktområdena avbildades under 5 MPa normalspänning, samma initiala normalspänning som användes i de efterföljande direkta skjuvtesterna. Vid belastning färgades de områden som var i kontakt röda, där färgintensiteten motsvarade en viss trycknivå. Därefter digitaliserades den färgade filmen med hjälp av en särskild skanner och mjukvara från Fuji Digital Analysis System, modell FDP-8010E. Förfarandet för tryckmätningen illustreras i Figur 2.

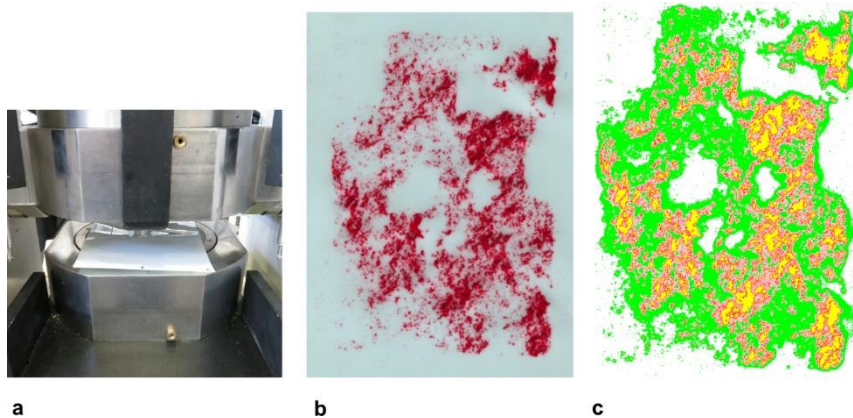
De direkta skjuvtesterna utfördes i enlighet med ISRM:s riktlinjer (Muralha et al. 2014). En normalspänning på 5 MPa, applicerad med en hastighet av 5 MPa/min, upprätthölls under testerna med CNL-randvillkor. 5 MPa applicerades även som initial normalspänning i testerna med CNS-randvillkor. Detta gör testerna under CNL- och CNS-randvillkoren jämförbara under den inledande fasen innan inverkan av påtagliga dilatationseffekter. Före de direkta skjuvtesterna konsoliderades bergproverna genom fyra normallastcykler i intervallet 0,5–12 MPa med en lastningshastighet på 10 MPa/min. En skjuvförskjutningshastighet på 0,5 mm/min användes. Provet stoppades när en skjuvförskjutning motsvarande 10 % av spricklängden uppnåts.



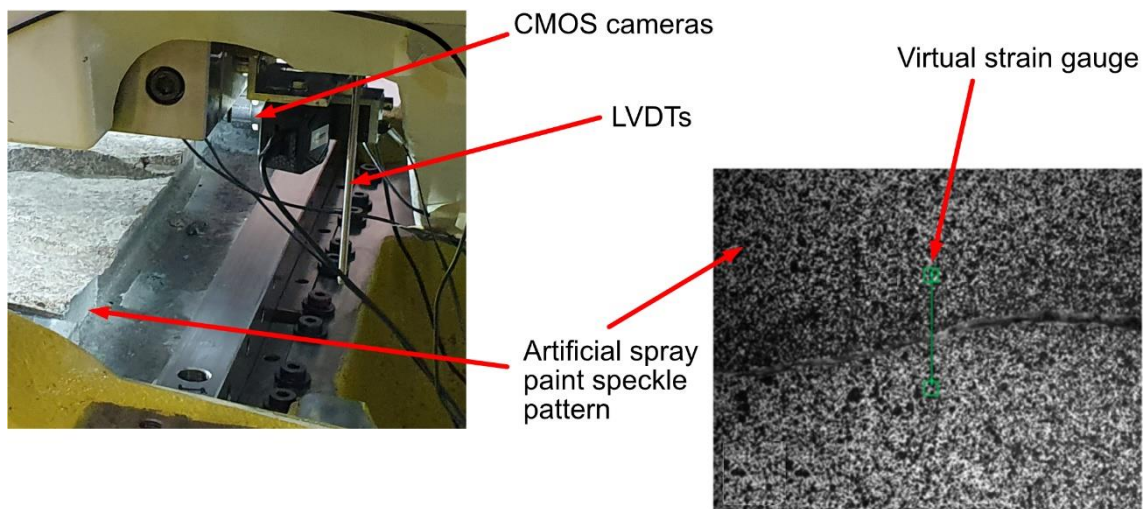
Figur 1: Moderblock (vikt omkring 20 ton) innehållande en naturlig spricka (a), generering av spänningsinducerad spricka med slägga och kilar (b), sågning av provkroppar (c), bergprov, ett av vardera storleken, som illustrerar förhållandet mellan sprickytorna (1:71 mellan minsta och största provstorlek) (d) provkropp före ingjutning i provhållare, med pålimmade stålinsatser för att förhindra kantbrott under skjuvning (e) ingjutet bergprov (f). Larsson, J et al. A Three-Factor Experimental Study on the Effect of Specimen Size on the Shear Strength of Rock Joints. Rock Mech Rock Eng (2025). CC BY 4.0

De relativa förskjutningarna i skjuv- och normalbelastningsriktningarna mäts både konventionellt mellan skjuvboxarna med linjära variabla förskjutningsgivare (LVDT), och unikt direkt över sprickprofilerna med digitala optiska bildkorrelationsmätningar (DIC). Grundprincipen bakom DIC är att mäta deformationen under belastning genom att analysera förskjutningen av ett mönster på ytan i en serie digitala bilder tagna under belastning. Detta sker genom att spåra positionen hos diskreta pixelgrupper i mönstret mellan bilderna. De direkta förskjutningarna bestämdes genom efterbehandling av bilderna i programvaran GOM Correlate (2020) med hjälp av virtuella 2D-extensometrar, vilka mätte mellan två pixelområden (Figur 3).

Inom den etablerade statistiska metoden variansanalys (ANOVA), se till exempel Johnson (2018), genomförs statistiska tester för jämförelse av flera medelvärden. För alla faktorer vars inverkan på responsvariabeln undersöks beräknas kvadratsumman av skillnaderna mellan deras medelvärden och det övergripande medelvärdet, som sedan delas med frihetsgraderna för att erhålla medelkvadraterna för faktoreffekterna. Felkvadratsumman, som uppskattar det slumpmässiga felet, beräknas genom att summera kvadraterna av skillnaderna mellan de enskilda observationerna och deras gruppmedelvärden, och därefter dividera med frihetsgraderna. Utvärderingen görs med



Figur 2: Kontakttrycksmätning med den tryckkänsliga filmen placerad på den nedre provkroppen i skjuvtestutrustningen före normalbelastning (a), film efter normalbelastning till 5 MPa, som visar kontaktområden i rött där färgintensiteten motsvarar tryckets storlek (b), färgad film efter digitalisering, där gröna områden indikerar tryck under, röda inom och gula över detektionsintervallet 2,5–10 MPa (c). Larsson, J et al. A novel method for geometric quality assurance of rock joint replicas in direct shear testing – Part 2: Validation and mechanical replicability, *Rock Mech Geotech Eng* (2023). CC BY-NC-ND 4.0



Figur 3: Uppställning av simultana konventionella indirekta förskjutningsmätningar med LVDT och direkta optiska mätningar med DIC.

ett F-test baserat på kvoten mellan medelkvadraten för faktoreffekten och felmedelkvadraten. En hög kvot indikerar att faktorn har en påverkan på responsvariabeln. Den statistiska analysen utfördes i den kommersiellt tillgängliga programvaran SPSS (2023).

3 Definitioner för skjuvhållfasthet och skjuvstyvhet

Trots att skjuvhållfasthet och -styvhet är grundläggande parametrar, som används i exempelvis hållfasthetskriterier, numeriska beräkningar och vid bestämning av säkerhetsfaktorer, saknas det inom branschen överenskomna och generellt accepterade definitioner för dessa parametrar. Exempelvis förekommer det att skjuvhållfastheten bestäms som den maximala skjuvspänningen eller som medelvärdet av skjuvspänningarna för förskjutningar större än 1 mm (Muralha et al. 1990). Exempel på bestämning av skjuvstyvheten är sekanten till skjuvspänning–skjuvförskjutningskurvan (τ – δ_s) mellan 25 % och 75 % av maximalskjuvspänningen (Amadei et al. 1998), mellan 50 % och maximalskjuvspänningen (Giwelli et al. 2014), mellan noll och maximalskjuvspänningen (Bandis 1980 och Kumar et al. 2016), mellan noll och punkten för maximal krökning, samt skjuvspänningen vid 50 % av maximalskjuvspänningen (Hungri et al. 1978). Grasselli (2001) använde lutningen hos tangenten vid 50 % av maximalskjuvspänningen.

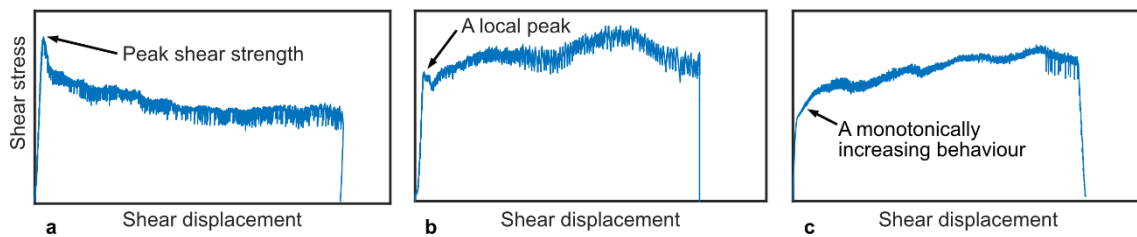
Utöver att enhetliga definitioner behövs formuleras, bör dessa också ha en fysikalisk koppling. Därför föreslås följande definitioner. *Skjuvhållfastheten utgörs av spänningen vid fullt mobiliserad friktion, associerad med omfattande skador på asperiteterna.* Denna definition är fysikalisk kopplad i det att spänningen motsvarar tillståndet då sprickan börjar plasticeras och där efterföljande förskjutningar sällan kan tolereras. *Skjuvstyvheten bestäms som förhållandet mellan spännings- och förskjutningsintervallen under perioden då energi lagras i sprickan genom elastiska deformationer.* Denna definition är fysikaliskt kopplad och motsvarar den generella ingenjörsmässiga uppfattningen om vad som utgör ett materials styvhet.

4 Resultat

4.1 Bestämning av skjuvhållfasthet och skjuvstyvhet

Frågan är då hur skjuvhållfastheten, definierad som skjuvspänningen vid fullt mobiliserad friktion, kan identifieras. För vissa sprickor kan man tänka sig att skjuvhållfastheten motsvaras av den maximala skjuvspänningen (Figur 4a). För andra sprickor är det tänkbart att skjuvhållfastheten sammanfaller en lokal maximal skjuvspänning (Figur 4b). En tredje typ av sprickor uppvisar en monotont ökande trend, och i detta fall är det svårt att göra en kvalificerad gissning (Figur 4c). Exempelen pekar på behovet av ett tillvägagångssätt för att identifiera fullt mobiliserad friktion, och därmed bestämma skjuvhållfastheten, som är konsekvent tillämpligt oavsett karakteristik.

Det visar sig att tidsdata kan användas för att identifiera den tidpunkt då skjuvspänningen motsvarar tillståndet vid fullt mobiliserad friktion. I Figur 5a–c visas skjuvcylinderns rörelse som den streckade linjen, och de relativa förskjutningarna hos

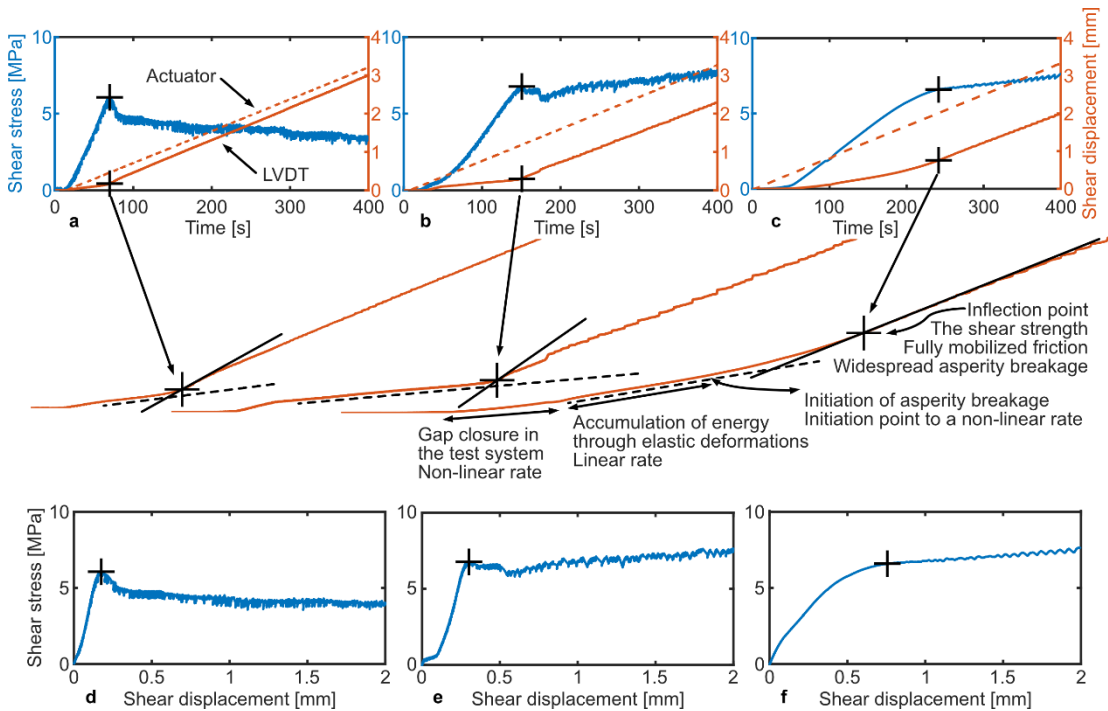


Figur 4: Exempel på tre vanligt förekommande $\tau - \delta_s$ - karakteristika. Larsson, J et al. *A Three-Factor Experimental Study on the Effect of Specimen Size on the Shear Strength of Rock Joints. Rock Mech Rock Eng (2025). CC BY 4.0*

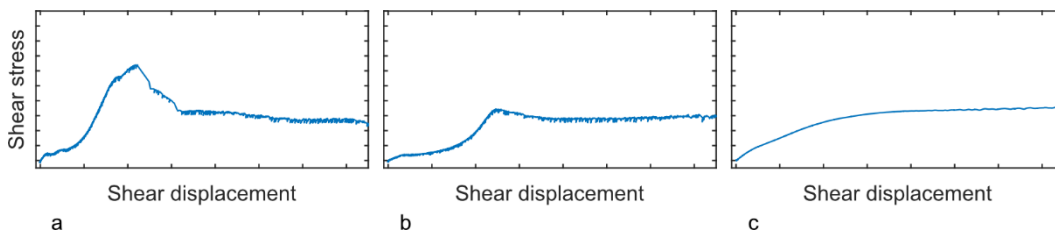
skjuvboxarna — hädanefter LVDT-förskjutningar — under de första 400 sekunderna för motsvarande prover i Figur 4. Medan skjuvcylindern rör sig med en konstant förskjutningshastighet kännetecknas den initiala fasen av LVDT-kurvorna av ett olinjärt beteende, där de uppmätta förskjutningarna är mindre än skjuvcylinderns rörelse (placerad på motsatt sida av skjuvboxen i förhållande till LVDT-givarna). Detta indikerar konsolidering av ojämnheter i kontaktytor och glapp i testsystemet (alla komponenter mellan LVDT-mätpunkterna). Därpå följer en fas där LVDT-förskjutningarna ökar linjärt med tiden, vilket markeras av de streckade svarta linjerna i förstoringarna till Fig. 5a–c. Under denna fas ackumuleras elastiska deformationer i systemet och skjuvspänningsökningen är konstant, vilket även framgår av skjuvspänningskurvorna mot tid. Den linjära fasen följs av en gradvis övergång till en ytterligare olinjär fas, med successivt minskande skjuvstyvhet (d.v.s. ökande förskjutningshastighet) och samtidigt minskande skjuvspänningsökning. Denna fas markerar initiering av asperitetsbrott, vilket fortsätter fram till den punkt där friktionen är fullt mobiliserad och omfattande asperitetsbrott inträffar, vilket indikeras av att skjuvförskjutningshastigheten når sitt maximum. Korsmarkeringarna visar dessa punkter, vilka motsvarar skjuvhållfastheten. Skjuvhållfastheten identifieras alltså vid den tidpunkt på kurvan över δ_s-t (tid), som motsvarar inflektionspunkten eller tangentpunkten — det vill säga när andra derivatan av δ_s med avseende på t för första gången blir noll efter initiering av asperitetsbrott. Lutningen vid denna punkt framgår av de svarta heldragna linjerna i förstoringarna i Fig. 5a–c. Efter uppnådd skjuvhållfasthet minskar skjuvförskjutningshastigheten och en gradvis övergång till kurvorna för cylinderförskjutning och LVDT-förskjutning blir parallella påbörjas. I denna fas ackumuleras inga ytterligare deformationer i testsystemet. Figur 5d–e visar $\tau-\delta_s$ -kurvorna, där skjuvhållfastheterna markeras med kors. Det föreslagna tillvägagångssättet är således tillämpligt oavsett utseendet på $\tau-\delta_s$ -kurvorna och identifierar den fysikaliskt definierade skjuvhållfastheten.

Motsvarande frågeställning som för skjuvhållfastheten gäller för skjuvstyvheten; hur kan skjuvstyvheten bestämmas på ett konsekvent tillämpligt sätt oavsett karakteristik?

Utmaningen illustreras i Figur 6, som visar den inledande delen av tre τ - δ_s -kurvor med olika karakteristik.



Figur 5: Skjuvhållfastheter vid fullt mobiliserad friktion, härledda från inflektionspunkterna i förskjutningskurvorna, markerade för tre olika skjuvmekaniska karakteristika. Larsson, J et al. A Three-Factor Experimental Study on the Effect of Specimen Size on the Shear Strength of Rock Joints. Rock Mech Rock Eng (2025). CC BY 4.0

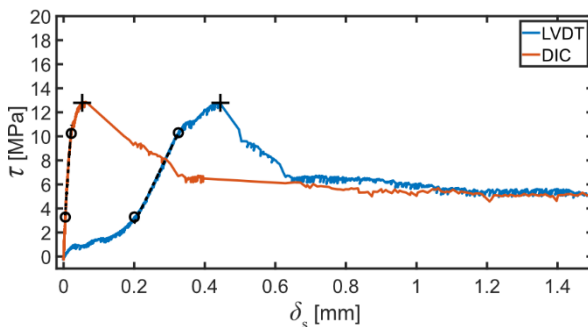


Figur 6: Exempel på den inledande delen av τ - δ_s -kurvor för tre vanligt förekommande karakteristika, som illustrerar utmaningen att identifiera intervallen från vilka skjuvstyvheten skall bestämmas.

Svaret är att genom att, i likhet med skjuvhållfastheten, studera skjuvförskjutningarna i tidsdomänen kan intervallet identifieras från vilket skjuvstyvheten skall bestämmas. Med hänvisning till den tidigare beskrivningen till Figur 5 identifieras först tidsintervallet inom vilket skjuvförskjutningshastigheten är konstant, det vill säga i

intervallet inom vilket δ_s - t -kurvan är linjär (indikerad med svart-streckad linje i Figur 5 a–c). Inom detta intervall ackumuleras energi genom elastiska deformationer i testsystemet, vilket överensstämmer med den föreslagna fysikaliskt grundade definitionen. Från tidpunkterna som definierar intervallet kan därefter motsvarande skjuvspänningar i τ - t kurvan identifieras. Slutligen identifieras motsvarande skjuvförskjutningar i τ - δ_s -kurvorna utifrån skjuvspänningarna.

I Figur 7 visas ett exempel där intervallen för bestämning av skjuvhållfastheten, identifierade med det föreslagna tillvägagångssättet, indikeras med ringformade markörer. τ - δ_s -kurvorna visas för förskjutningsmätningar både konventionellt indirekt över sprickan med LVDT och direkt med DIC. Från skillnaderna på lutningarna inom intervallen ses att konventionella indirekta förskjutningsmätningar underskattar skjuvstyvheten betydligt, i denna studie i medel med en faktor fem. Detta förklaras med att indirekta mätningar inkluderar, utöver sprickdeformationer, även elastiska deformationer i testsystemet. Vidare noteras att den inledande olinjära delen i de indirekta LVDT-mätningarna inte återfinns i DIC-mätningarna. Den olinjära delen beskriver alltså konsolidering av ojämnheter i kontaktytor och glapp i testsystemet. Denna del skall således inte inkluderas vid bestämning av skjuvstyvheten, vilket det föreslagna tillvägagångssättet beaktar.



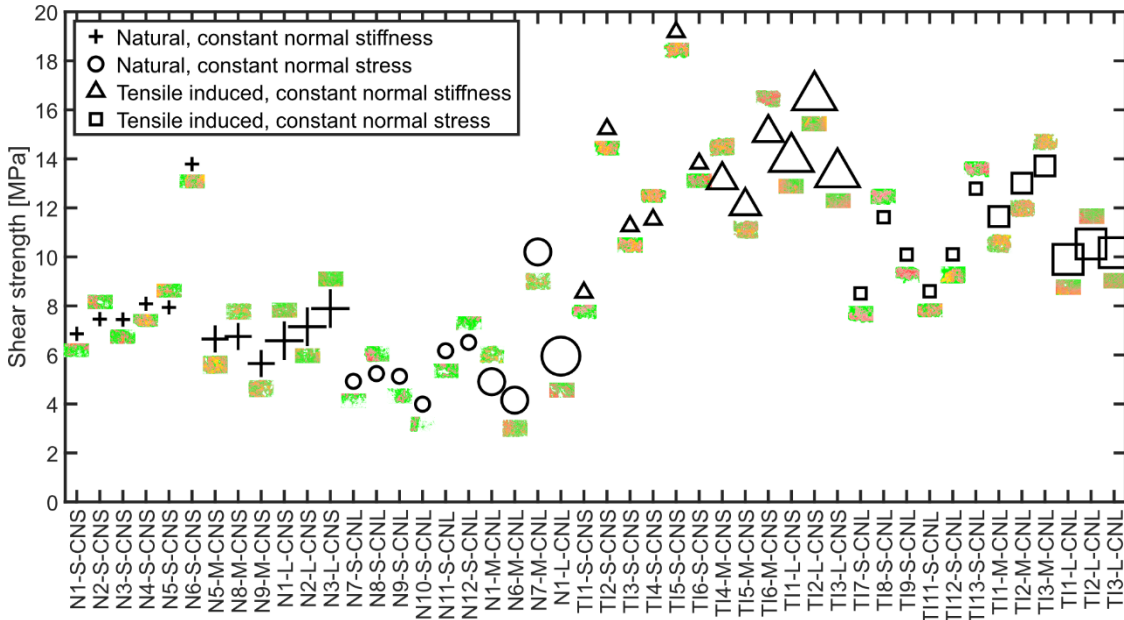
Figur 7: Jämförelse mellan indirekta konventionella förskjutningsmätningar med LVDT och optiska DIC mätningar direkt över sprickprofilen, där de ringformade markörerna indikerar intervallet, identifierat med det föreslagna tillvägagångssättet, från vilket skjuvstyvheten bestäms.

4.2 Skjuvmekaniska parametrars skalberoende

Figur 8 visar resultaten för skjuvhållfastheterna för samtliga provkroppar. Studien utgörs av de tre experimentella faktorerna spricktyp, randvillkor och provstorlek med tillhörande nivåer, och kan betraktas som ett $2 \times 2 \times 3$ -faktor försök. Modellen för tre-faktor försöket, med skjuvhållfastheten τ som responsvariabel, kan skrivas som

$$\tau_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \varepsilon_{ijkl}. \quad (1)$$

där μ är skärningspunkten, ε är feltermen, och nedsänkt index l anger antalet utförda tester för varje experimentell kombination, medan övriga index definieras i Tabell 1.



Figur 8: En sammanställning av skjuvhållfastheterna med motsvarande digitaliserade bilder från kontaktrycksmätningarna från alla fyrtiosex direkta skjuvtester, indelade i fyra grupper motsvarande markörernas form, där deras storlek korrelerar med provstorleken. Larsson, J et al. A Three-Factor Experimental Study on the Effect of Specimen Size on the Shear Strength of Rock Joints. Rock Mech Rock Eng (2025). CC BY 4.0

Faktor	Spricktyp		Randvillkor		Provstorlek [mm × mm]		
	(α_i)		(β_j)		(γ_k)		
Nivå	N	TI	CNL	CNS	35 × 60	70 × 100	300 × 500
	i=1	i=2	j=1	j=2	k=1	k=2	k=3

Tabell 1: Beteckningar på faktorerna med tillhörande nivåer. Larsson, J et al. A Three-Factor Experimental Study on the Effect of Specimen Size on the Shear Strength of Rock Joints. Rock Mech Rock Eng (2025). CC BY 4.0

Hypoteser kan nu formuleras för varje faktor, där hypotesen för spricktyp visas som exempel:

$$\left. \begin{array}{l}
 H_0: \text{Effekten från spricktyp på skjuvhållfasthet är noll. } \alpha_1 = \alpha_2 = 0 \\
 H_1: \text{Effekten från spricktyp på skjuvhållfasthet är inte noll.} \\
 \text{Alla } \alpha \text{ är inte lika med noll.} \\
 \text{Signifikansnivå. } \alpha = 0.05
 \end{array} \right\} \quad (2)$$

Genom variansanalys kan statistiska slutsatser dras om vilka faktorer som påverkar skjuvhållfastheten. Tabell 2 visar resultaten från variansanalysen. Från P-värdena framgår tydligt att provstorleken inte inverkar på skjuvhållfastheten, medan både spricktyp och randvillkor gör.

Faktor	Kvadrat- summa [MPa ²]	Antal frihetsgrader	Medel- kvadrat [MPa ²]	Förkastande-		
				kriterium F >	F	P-värde
Spricktyp	354.965	1	354.965	4.08	77.349	0.000
Randvillkor	64.719	1	64.719	4.08	14.104	0.001
Provstorlek	1.211	2	0.606	3.24	0.132	0.877
Slumpmässigt fel	188.130	41	4.589			

Tabell 2: Resultaten från variansanalysen. Larsson, J et al. *A Three-Factor Experimental Study on the Effect of Specimen Size on the Shear Strength of Rock Joints. Rock Mech Rock Eng (2025). CC BY 4.0*

Motsvarande analyser för skjuvstyvheten presenteras i Larsson et al. (2026). På denna parameter inverkar inte randvillkor, medan både spricktyp och provstorlek gör.

5 Diskussion och slutsatser

En unikt omfattande experimentell studie har genomförts från vilket ny kunskap om bergsprickors skjuvmekaniska beteende tagits fram. I avsaknad av inom branschen överenskomna och generellt accepterade definitioner för skjuvhållfasthet och skjuvstyvhet har två fysikaliskt kopplade definitioner presenterats. Skjuvhållfastheten definieras av spänningen vid fullt mobiliserad friktion, förknippad med omfattande skador på asperiteterna. Skjuvstyvheten bestäms som förhållandet mellan spännings- och förskjutningsintervallen under perioden då energi lagras i sprickan genom elastiska deformationer. Även tillvägagångssätt för fastställande av dessa parametrar enligt definitionerna har introducerats. Genom att studera skjuvförskjutningarna i tidsdomänen kan tidpunkten för skjuvförskjutningshastighetens maximum, vilken sammanfaller med tidpunkten för omfattande asperitetsbrott. och motsvarande spänning identifieras. Denna spänning utgör skjuvhållfastheten. På motsvarande sätt kan intervallen för skjuvspänningar och skjuvförskjutningar där skjuvförskjutningshastigheten är konstant identifieras. Inom detta intervall, från vilket skjuvstyvheten bestäms, lagras energi enbart genom elastiska deformationer.

Genom innovativa laboratorieuppställningar har simultana indirekta konventionella förskjutningsmätningar med LVDT, och optiska direkta mätningar över sprickprofiler genomförts. Då resultaten visar att skjuvstyvheten baserad på konventionella mätningar kraftigt underskattas, är det rimligt att anta att det finns stora ekonomiska och säkerhetsmässiga värden att spara genom att införa optiska deformationsmätningar som praxis. Ett led i detta är att, som ett föreslaget kommande arbete, utföra osäkerhetkvantifiering av DIC-mätningar på bergssprickor enligt industristandard, som grund för ackreditering av laboratorier. Resultaten ger även anledning att undersöka effekten av att använda högre styvheter i numeriska beräkningsmodeller, och kan även innebära behov av översyn av konstitutiva modeller.

Variansanalys visar att spricktyp och randvillkor inverkar på skjuvhållfastheten, men inte sprickstorlek. På skjuvstyvheten inverkar spricktyp och sprickstorlek, men inte randvillkor. I Larsson et al. (2025) och Larsson et al. (2026) presenteras ett sammanhängande ramverk av konceptuella förklaringsmodeller till observationerna. En möjlig förklaring till att skjuvstyvheten är storleksberoende, men inte skjuvhållfastheten, kan utgöras av den grundläggande skillnaden att skjuvstyvhet i första hand styrs av elasticitet, medan skjuvhållfasthet i första hand styrs av brott i asperiteter. Fenomenet bakom spricktypens inverkan kan grundas i att spänningsinducerade sprickor har en jämnare kontakttrycksfördelning och en högre grad av låsning mellan asperiteterna jämfört med naturliga sprickor. Randvillkorets inverkan på skjuvhållfastheten kan förklaras med inverkan från dilatation under CNS-tester. Eftersom skjuvstyvheten bestäms från ett intervall före initiering av dilatation inverkar randvillkoret inte på denna parameter.

Att denna studie inte kan påvisa något storleksberoende på skjuvhållfastheten kan innebära att sprickstorleken inte behövs beaktas i skjuvhållfasthetskriterier, vilket förenklar utvecklingen av sådana. Analys grundad på 3D-skanning i Larsson et al. (2025) indikerar dock att ytterligare geometriska faktorer utöver den initiala kontakten mellan asperiteterna inverkar. I fasen mellan initiering av asperitetsbrott och fullt mobiliserad friktion förändras kontaktvillkoren, vilket indikeras av att det verkar finnas ett samband mellan ett jämnt fördelat initialt kontakttryck och skjuvstyvhet, medan ett sådant samband inte kan observeras för skjuvhållfasthet (Figur 8). Framtida forskning bör därför använda de unika resultaten från experimenten till att validera existerande modeller och för att skapa en bättre förståelse kring vilka sprickgeometriska faktorer som inverkar på skjuvhållfastheten utifrån analyser av 3D-skanningdata. Sådana analyser kan också användas för att förstå vilka geometriska faktorer som inverkar på skjuvstyvheten och hur denna parameters skalberoende skall modelleras. Då förhållandet mellan skjuv- och normalstyvhet är av betydelse i numeriska beräkningar är det också av relevans att genomföra en analys för normalstyvhet motsvarande den för skjuvstyvhet. Detta mot bakgrund av den påvisade effekten av att mäta förskjutningar direkt över sprickan och för att studera storleksberoendet.

Resultaten som redogjorts för här kan uppfattas vara av grundforskningskaraktär. Det skall dock noteras att resultaten är direkt kopplade till frågeställningar som bergmekaniker dagligen förväntas hantera. Den kunskap som denna och framtida forskning baserat den experimentella studien kan därför förväntas ge direkt återverkan på ekonomi, resursutnyttjande och tillförlitlighet i samband med byggande i berg.

Tackord

Ett stort tack till BeFo, NWMO, RISE och SKB för finansieringen av experimenten och forskningen.

Referenser

- Amadei, B., Wibowo, J., Sture, S., Price, R., 1998. Applicability of existing models to predict the behavior of replicas of natural fractures of welded tuff under different boundary conditions. *Geotechnical & Geological Engineering* 16: 79–128. <https://doi.org/10.1023/A:1008886106337>
- Bandis, S., 1980. Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints. Dissertation at the University of Leeds
- Bandis, S., Lumsden, A., Barton, N., 1983. Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20: 249–268. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90595-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90595-8)
- Barton N (1973) Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology* 7: 287–332. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6)
- Clough, G.W., Duncan, J.M., 1969. Finite element analyses of Port Allen and Old River Locks. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Engineer Research and Development Center (U.S.) <http://hdl.handle.net/11681/20529>
- GOM Correlate (2020) 2020 Hotfix 6, Rev. 144376, Build 2021-12-03, Zeiss <https://www.zeiss.com/metrology/en/software/zeiss-correlate.html>
- Giwelli, A.A., Sakaguchi, K., Gumati, A., Matsuki, K., 2014. Shear behaviour of fractured rock as a function of size and shear displacement, *Geomechanics and Geoengineering*, 9:253-264, <https://doi.org/10.1080/17486025.2014.884728>
- Grasselli, G., 2001. Shear strength of rock joints based on quantified surface description. Dissertation at Ecole Polytechnique Federale De Lausanne
- Grasselli G, Egger P (2003) Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40: 25-40. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00101-6)
- Haberfield CM, Szymakowski J (2003) Application of large scale direct shear testing. *Australian Geomechanics: News journal of the Australian Geomechanics Society*, 38(1): 29–39. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.814329096425742>
- Hungr, O., Coates, D.F., 1978. Deformability of joints and its relation to rock foundation settlements. *Canadian Geotechnical Journal*. 15(2): 239-249
- Jacobsson L, Mas Ivars D, Kasani HA, Johansson F, Lam T (2021) Experimental program on mechanical properties of large rock fractures. *IOP Conference Services: Earth and Environmental Science*. 833 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012015>

Johnson RA (2018) Miller & Freund's probability and statistics for engineers. 9th ed. ISBN 10: 1-292-17601-6. Pearson Education Limited, England

Kumar, R., Verma, A.K., 2016. Anisotropic shear behavior of rock joint replicas International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 90:62–73

Larsson, J., Flansbjer, M., Jacobsson, L. *et al.* A Three-Factor Experimental Study on the Effect of Specimen Size on the Shear Strength of Rock Joints. *Rock Mech Rock Eng* (2025). <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04954-2>

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. *Undergranskning hos Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*

Muralha J, Pinto da Cunha, A (1990b) Analysis of scale effects in joint mechanical behaviour. Paper presented at the First international workshop on scale effects in rock masses. Pinto da Cunha (ed.). A.A. Balkema, Rotterdam. ISBN 90 6191 126 5

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. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0519-z>

Patton FD (1966) Multiple modes of shear failure in rock. Paper presented at the 1st ISRM Cong. September 25–October 1 1966 Lisbon Portugal

Ríos-Bayona F, Johansson F, Mas-Ivars D (2021) Prediction of Peak Shear Strength of Natural, Unfilled Rock Joints Accounting for Matedness Based on Measured Aperture. *Rock Mechanics and Rock Engineering* <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02340-8>

SPSS (2023) Version 29.0.1.0 (171), IBM SPSS Statistics, <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>

Wu, X., Zheng, H., Jiang, Y., 2022. Study on the evolution law of rock joint shear stiffness during shearing process through loading-unloading tests. *Tunnelling and Underground Space Technology* 127 <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104584>