

En spänningsmätningssmetod för ofullständigt sprucket berg.

Föreliggande uppfinning avser en metod att bestämma spänningstensorn i berget i den punkt där ett litet jordskalv (mikroskalv) observerats. Sådana mikroskalv förekommer dels i jordskalvszoner speciellt före större jordskalv och dels vid mänsklig aktivitet som stör bergets jämvikt, exempelvis vid gruvor, oljefält, geotermisk produktion, vattendammar mm. Kännedom om spänningsfältet är centralt för att kunna göra konsekvensanalys av planerade möjliga produktionsmetoder. De konsekvenser för vilka bergets spänningsfält är centralt rör stabilitet (sprickrörelser kan skada borrhål), skalvrisker (kan orsaka ras mm) och vätskeflödet i berget (olja, gas och vatten). En säker planering kräver alltså kunskap om bergets spänningar.

Idag användes fortfarande dyra mätningar i borrhål för att få information om bergets spänningar. Föreliggande uppfinning beskriver en metod som både är bättre och billigare ifall mikroskalv förekommer i berget och som kan användas när berget är ofullständigt sprucket.

De mikroskalv som observeras och registreras orsakas genom att man fått instabilitet längs någon spricka. Stabiliteten beskrivs av bergspänningarna tillsammans med vätske/gastrycket i spricksystemet. Den spänningsmätningssmetod som här beskrivs ger den bergspänningstensor som orsakat ett givet mikroskalv. Det krävs kännedom om mikroskalvets så kallade FPS (Fault Plane Solution). Dominerande källmekanism för mikroskalven är en skjuvning (glidning) längs ett sprickplan. En sådan mekanism beskrivs av tre vinklar, skalvets FPS, som definierar skalvplanet, orientering och glidningens riktning i skalvplanet. I det följande låter vi skalvets FPS vara beskriven av två enhetsvektorer, sprick-

planetets normal N och skjuvningsvektorn D i skjuvningens riktning längs planet. Dessa två riktningar är bestämda av de tre parametrarna som ges av skalvets FPS. Observera att N och D beskriver samma FPS som $-N$ och $-D$. I allmänhet så saknas kunskap om vilken av de två vektorerna som är planetets normal (och vilken som är skjuvningsvektor). Man kan alltså inte skilja på N och D för en känd FPS.

Den metod som här beskrivs ger inte bara spänningstensorn utifrån en FPS utan ger också besked om vilken vektor som är N och vilken som är D av de två vektorer som ges av FPS.

Uppfinningen ger den spänningstensor som orsakat skalvet. Notera att ändringen av spänningsfältet som skalvet ger lätt kan beräknas med standard metoder inom seismologin och med hjälp av att metoden också identifierar vilken av de två vektorerna som är N . Uppskattningen av det radande fältet blir alltså baserat på alla mikroskalvsobservationer plus de spännings-ändringar som mikroskalven ger. Mycket ofta är mikroskalvens spänningseffekter så små jämfört med det totala spänningarna (även jämfört med den absoluta deviatoriska delen) att de approximativt kan försummas trots att de lätt kan beräknas. Ett stort antal mikroskalv ger alltså med denna metod ett stort antal observationer av spänningstensorn. Genom att till exempel använda medianvärdet för den spänning eller stabilitet som studeras för de mest närliggande mikroskalven fas en robust uppskattning.

Uppfinningen löser spänningsbestämningsproblemet genom att den utformas på det sätt som framgår av det efterföljande självständiga patentkravet. Lösningen bygger på att man implementerar det nedan beskrivna metoden i en dator.

Vi utgår från att vi har ett givet sprickplan med orientering bestämd av vektorn N och en tillhörande skjuvningsriktning D enligt ovan. För det fall att man inte vet vilket av de två möjliga

sprickplanen som är det rätta (vektorerna N och D kan skiftas) görs beräkningarna för vardera fallet. Uppfinningen ger sedan när båda beräkningarna är klara ett svar på vilket sprickplan som är det rätta i enlighet med senare förklaring.

Bergets spänningsfält är ett tensorfält som i varje punkt har sex oberoende parametrar. Det är ofta enklast att ge dessa sex parametrar som huvud-spänningarnas riktningar (tre vinklar) och de tre huvudspänningarnas storlekar, dvs sex parametrar.

En sprickas instabilitet brukar kvantifieras med parametern *CFS*, Coulomb Failure Stress, en Google-sökning efter begreppet gav 39100 resultat inom 0.25 sek (okt 2011), dvs parametern är välbekant inom jordskalvsforskningen. Den anger stabiliteten för en given sprickorientering i en given riktning, se mera nedan. När vi har en observerad glidning (instabilitet) på ett känt plan, N , och med känd glidningsriktning, D , så vet man att instabiliteten blivit noll för planet N med glidningen D , dvs $CFS(N, D) = 0$. Man vet också att instabiliteten inte varit större i någon annan glidningsriktning vilket innebär att skjuvspänningen på planet har samma riktning som glidningen, detta kallas ofta Bott's kriterium. Tillsammans ger detta två begränsningar på spänningstensor.

En tredje rimlig approximativ begränsning fas om spänningen i någon riktning är känd. Mycket vanligt är att det vertikala trycket (normalspänningen i vertikalled) kan antagas vara ungefär lika stor som litostatiska trycket (bergtrycket) orsakat av gravitationen. Detta ger då ytterligare en begränsning vilket innebär att man har totalt tre begränsningar på spänningstensor.

För varje uppsättning av huvudspänningsriktningar (för varje orientering av huvudspänningsriktningarna) kan alltså huvudspänningarna enkelt bestämmas. Antalet möjliga spänningstensorer är obegränsat.

Denna uppfinnings lösning på problemet är att som lösning välja den spänningstensor som minimerar deformationsenergin relativt det isotropa spänningstillståndet med alla huvudspänningar lika med det kända trycket.

När man observerar ett mikroskalv (skjuvning på ett sprickplan) så ligger implicit i observationen att alla andra sprickor runt skalvet har varit stabila. Om man antar att det finns sprickor i alla riktningar i skalvets omedelbara närhet så kommer man till en lösning som redan är patenterad. Den lösning som angetts ovan kan alltså vara felaktig om sprickor finns i närområdet. I många fall sker mikroskalven i sprickzoner med ett stort antal semiparallella sprickor nära intill. I en del fall har bergmassan sprickkarterats så att man känner till orienteringarna på de vanligaste sprickorna. Båda dessa fall hanteras i denna metod genom att man kontrollerar instabiliteten, *CFS*, på alla vanligen förekommande sprickor och godkänner som lösning endast de som ger negativt *CFS* (stabilitet) i alla riktningar på de sprickor som eventuellt antas finnas i skalvets närområde.

Materialparametrar för berg och sprick-system

E = bergets elasticitetsmodul (normalt ca 90 GPa) ν = Poissons kvot för berget (normalt ca 0.25) f = friktionskoefficient för sprickor (normalt ca 0.6) t_o = sprickhallfasthet vid skjuvning (normalt 0.5-2 MPa)

Sprickplanets orientering och skjuvriktningen

z = sprickans djup. $z=0$ vid ytan N = enhetsvektor i sprickplanets normalriktning D = enhetsvektor som ger skjuvriktningen. D

ligger i sprickplanet

N och D definierar samma skjuvning som $-N$ och $-D$. Vid analysen av små jordskalv kan man ofta inte veta vilken av dessa två enhetsvektorer som verkligen är sprickplanets normalvektor och vilken som är verkliga skjuvningsvektorn. Då måste båda möjligheterna medtas i analysen.

***CFS*, Coulomb Failure Stress.**

CFS-begreppet är välkänt för en fackman på området.

CFS för en given spricka och skjuvriktning, N och D , kan skrivas

$$CFS(N, D) = \tau - f(\sigma_N - p) - t_o.$$

där CFS = instabiliteten på sprickan, kallas också Coulomb Failure Stress. τ = skjuvspänningen på sprickplanet i riktning D . σ_N = sprickplanets normalspänning. p = vätske/gas-trycket och t_o = skjuvhallfastheten för sprickan då $\sigma_N = p$. Observera att vi här inkluderar det så kallade portrycket p , som subtraheras från alla normaltryck vilket är en standard metod vid beräkningar av friktionsstabilitet i medier innehållande vatten. $\sigma_N - p$ kallas normalt för effektiva normalspänningen.

Da *CFS* är noll blir planet instabilt och skjuvning sker vilket är ett av de två villkor som *CFS* ger. Det andra villkoret är att τ ovan skall vara i samma riktning som den observerade glidningen D .

Lat de tre obekanta huvudspänningarna skrivas som:

$$\sigma_1, \sigma_2 \text{ och } \sigma_3.$$

Och lat en godtycklig men känd orientering av de tre huvudspännings-riktningarna, som alla är vinkelräta mot varandra.

ges av

S_1 = enhetsvektor som ger riktningen för σ_1 .

S_2 = enhetsvektor som ger riktningen för σ_2 .

S_3 = enhetsvektor som ger riktningen för σ_3 .

och låt vektorn B vara enhetsvektorn som är vinkelrät mot N och D .

Enligt elasticitetsteorin kan skjuvspänningen τ_o , skjuvspänningen vinkelrätt mot D , skrivas

$$\tau_o = \sigma_1(S_1B)(S_1N) + \sigma_2(S_2B)(S_2N) + \sigma_3(S_3B)(S_3N),$$

där (S_1B) betecknar skalärprodukten mellan vektorerna S_1 och B , dvs alla parenteser med två vektorer är skalärprodukter.

På samma sätt fås att τ , skjuvspänningen i riktning D , skrives

$$\tau = \sigma_1(S_1D)(S_1N) + \sigma_2(S_2D)(S_2N) + \sigma_3(S_3D)(S_3N),$$

med samma skalärprodukt konvention.

Enligt elasticitetsteorin kan normalspänningen σ_N på planet med normalriktningen N skrivas som

$$\sigma_N = \sigma_1(S_1N)(S_1N) + \sigma_2(S_2N)(S_2N) + \sigma_3(S_3N)(S_3N),$$

där parenteserna innehållande två vektorer betecknar deras skalärprodukt.

De två villkor som fås av instabilitetsvillkoret är alltså :

$$\sigma_1(S_1B)(S_1N) + \sigma_2(S_2B)(S_2N) + \sigma_3(S_3B)(S_3N) = 0$$

och villkoret $CFS = 0$ skrives

$$\tau(enLovan) - f(\sigma_N(enLovan) - p) - t_o = 0.$$

Därmed är de två villkor på spänningstensorn som hämtas från CFS -villkoret (instabilitetsvillkoret) formulerade. De enda obekanta är de tre huvudspänningarna. Ett till villkor behövs.

Spänningen σ_v känd i en känd riktning.

Metoden förutsätter att normalspänningen, σ_v , i en känd riktning S_v (enhetsvektor), är känd. Det vanligaste fallet är stt S_v är vertikal och σ_v kan antas vara

$$\sigma_v = \rho_b z g$$

där ρ_b = bergets medeldensitet mellan ytan och djupet z och g = gravitationsaccelerationen.

Låt $\gamma_1 = (S_1 S_v)$, $\gamma_2 = (S_2 S_v)$ och $\gamma_3 = (S_3 S_v)$, där $(S_i S_v)$ betecknar skalärprodukten av vektorerna S_i och S_v etc. Då gäller enligt elasticitetsteorin att normalspänningen σ_v kan skrivas

$$\sigma_v = \gamma_1^2 \sigma_1 + \gamma_2^2 \sigma_2 + \gamma_3^2 \sigma_3$$

vilket är den tredje ekvationen för huvudspänningarnas storlekar, σ_1 , σ_2 och σ_3 .

Alltså för varje känd riktning på huvudspänningarna fas tre linjära villkor som ger huvudspänningarna.

Vattentrycket p

Metoden kräver att vattentrycket är känt eller kan relateras till kända parametrar. Det kan antingen vara känt genom direkta mätningar i borrhål eller annat eller antas vara hydrostatiskt i de fall att spricksystemet har konduktiv förbindelse med en referensyta (ofta grundvattennivan) och är i jämvikt. Om det kända trycket i referensnivan betecknas p_o så blir då trycket p i ekvationerna

$$p = p_o + \rho_w h g.$$

där ρ = vätskans/vattnets/gasens densitet och h = vertikala djupet för skälvet under referensnivan (h kan naturligtvis även

vara negativt).

För det fall att man vet referensnivåns djup men inte har kunnat mäta trycket så kan trycket relateras till kända parametrar enligt

$$p = \sigma_v - C'_p,$$

och där C'_p lämpligen skrives som

$$C'_p = \frac{2\mu_v}{a} + (\rho_b - \rho_w)hg$$

där ρ_b = bergets densitet, ρ_w = vätskans/vattnets densitet och h = en längdparameter som anger skalvets vertikala djup under referensnivån och $a = (1 + f^2)^{0.5} - f$.

Slutligen kan man om inte heller referensnivåns läge är känt använda ett lämpligt medelvärde för h . Generellt beror h s medelvärde på bergets hållfasthet. För ung basalt är typiskt 800m ett lämpligt medelvärde för h medan t ex granit kan förväntas ha 1000 - 1600m.

Kriterium för val av bästa spänningstensor.

Som framgatt av ovan, så kan man för varje orientering av huvudspänningarna bestämma huvudspänningarnas storlek, så att de tre villkoren ovan uppfylls. Enligt metoden i denna uppfinning så skall den orientering av huvudspänningsriktningarna, som minimerar den elastiska deformationsenergin relativt ett isotropt spänningstillstånd med trycket σ_v , som är det kända trycket, väljas som orienteringen för den sökta spänningstensorns huvudspänningsriktningar. I detta fall blir det enrgiuttryck som skall minimeras (det finns olika sätt att skriva energin vilket är välkänt inom elasticitetsteori, en Google-sökning av "strain energy density" gav 4350000 resultat inom 0.25 sek. okt 2011):

$$G_{iso} = ((\sigma_1 - \sigma_c)^2 + (\sigma_2 - \sigma_c)^2 + (\sigma_3 - \sigma_c)^2 - 2\nu((\sigma_1 - \sigma_c)(\sigma_2 - \sigma_c) + (\sigma_1 - \sigma_c)(\sigma_3 - \sigma_c) + (\sigma_2 - \sigma_c)(\sigma_3 - \sigma_c)))/(2E)$$

Den orientering av huvudspänningarna som minimerar denna energin skall alltså tas som den sökta tensors huvudspänningsriktningar och med de huvudspänningar som fås från de tre linjära ekvationerna.

Om kunskap eller indikationer om övriga sprickor föreligger.

Berget är normalt sprickigt. För att uppskattningen av tensorn skall vara realistisk så får den erhållna tensorn inte ha positivt CFS för någon glidning på någon av övriga sprickorna inom skalvets närområde. Utan att sådan kontroll görs så gäller lösningen med säkerhet endast om andra sprickor saknas. I allmänhet innehåller dock berget flera olika sprickorienteringar inom hela sin volym. Om sådan kunskap finns så skall dessas stabilitet kontrolleras.

Låt oss anta att man inom skalvetsnärområde bedöms ha n stycken sprickorienteringar med normalvektorerna N_i , $i = 1, \dots, n$.

Man tar då och kontrollerar att för varje plan i , så är maximala CFS (alla riktningar kontrolleras) negativt. De tensorer som inte uppfyller alla dessa n stycken villkor förkastas. CFS beräknas på samma sätt som ovan men med vektorn N_i i stället för N och för alla riktningar i planet.

På detta sätt säkerställs att den erhållna spänningstensorn är realistisk.

Om man har anledning att anta att sprickor utöver sprickplanet saknas så blir $n = 0$.

Om man har två möjliga sprickplan

För mikrojordskalv har man i allmänhet två möjliga sprickplan med tillhörande skjuvningsriktningar. Deras normal- och skjuvningsvektorer (egenvektorer) betecknas N_1, D_1 och N_2, D_2 respektive. (För en FPS gäller då att $N_1 = D_2$ och $D_1 = N_2$.) Enligt den grundläggande metoden skall då vardera av de två möjligheterna analyseras var för sig. Det av de två möjliga sprickplanen som ger minsta G_{iso} är det verkliga sprickplanet och användes för bestämningen av spänningstensorn. Metoden ger i detta fall inte endast spänningstensorn som orsakat skallet utan ger också sprickplanet.