

SKATTNING AV SPRICKSTYVHET BASERAT PÅ HYDRAULISKA TESTER OCH INJEKTERINGSDATA

Estimation of fracture stiffness based on hydraulic testing and grouting data

Johan Thörn, Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers

Åsa Fransson, Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers

SAMMANFATTNING

När spricksystem i kristallint berg injekteras kan bergmassan deformeras. Sådana deformationer kan reducera injekteringseffektiviteten eftersom nya flödesvägar skapas. Arbetet som presenteras här visar att deformation förekommer vid hydrauliska tester och injektering och att man både kan mäta deformation i fält och utvärdera sprickstyvhet därifrån. Deformationsmätningar, hydrauliska tester och injektering utfördes under våren 2010 i Hallandsåstunneln och hydrauliska tester utfördes i en installations-tunnel i Göteborg (Runslätt & Thörn, 2010).

För mätning av fysisk deformation användes en nyutvecklad mätutrustning från Chalmers tekniska högskola. Deformation uppmättes sju gånger i ett borrhål i Hallandsås. Tre av dessa var för injektering, och fyra vid vattenförlustmätningar i närliggande borrhål. Majoriteten av deformationerna skedde vid pumptryck på 1-1,4 MPa, vilket är lägre än den beräknade bergspänningen. Sprickstyvheter har utvärderats på olika sätt, däribland en ny metod, (Fransson, et al., 2010). Generellt är styvheten lägre i Hallandsås än i Göteborgstunneln. Resultaten är i linje med resultat från andra undersökningar i fält.

ABSTRACT

When a fracture system in crystalline rock is grouted the rock mass may deform. Such deformations may reduce the grouting efficiency since new flow paths are opened. The work presented here show that deformations occur during hydraulic tests and grouting and that deformation can be measured and evaluated as stiffness from in situ tests. Deformation measurements, hydraulic testing, and grouting were conducted in spring 2010 in the Hallandsås tunnel and hydraulic testing was performed in a service tunnel in Gothenburg (Runslätt & Thörn, 2010).

For measuring physical deformation recently developed equipment from Chalmers University of Technology was used. Deformations were measured seven times in the same borehole. Three measurements were performed during grouting, and the remaining four during water pressure tests. Most deformations occurred at pump pressures of 1-1.4 MPa, which is lower than the calculated normal rock stress. Fracture stiffness has been evaluated in several ways, including a new method, (Fransson, et al., 2010). Generally the evaluated fracture stiffness is lower in the Hallandsås tunnel than in the Gothenburg tunnel. The results show agreement with other in situ experiments.

INTRODUKTION

Vid injektering i kristallint berg används ett betydande övertryck för att få in bruket i sprickorna. Detta övertryck kan få enskilda sprickor att vidgas, och en sådan deformation kan därför leda till vidgningar och skjuvrörelser längs det deformerade blockets andra kanter. Den här typen av rörelser kan försämra injekteringsresultatet, eftersom nya flödesvägar öppnas. Beroende på formen hos tunneltvärsnittet och riktningen hos bergsspänningsfältet lämnas ett område nära tunneln relativt avlastat i radiell riktning. I denna region är risken för injekteringsinducerade deformationer större.

I denna presentation ges resultatet och metodiken för en uppsättning deformationsmätningar som genomförts vid efterinjektering med silica sol i Hallandsås, samt kompletterande hydrauliska tester i en installationstunnel under Göteborg (Runslätt & Thörn, 2010). Resultaten presenteras som uppmätta deformationer, och omräknat i normalsprickstyvhet, enligt ett par olika metoder. Bergsspänningarna i Hallandsås varierar men har uppskattats till 4 respektive 2 MPa för största och minsta horisontella huvudspänningen. Tunneldimensionerna är ungefär 7 m bredd, 9 m höjd och borrhålen är 6 m långa med en lutning av 40° från tunnelmittlinjen. För den mer inspända Göteborgstunneln är motsvarande värden 10 och 5 MPa, 4 m bredd och höjd samt 30°.

TEORI

Effektivspänning, definierad enligt Terzaghi (ter Terzaghi (1943)), ekvation (1), kan här ses som summan av bergspänningen och portrycket, räknat över en spricka. Detta kan användas för att beräkna hydraulisk normalsprickstyvhet som ett mått på hydraulisk viddförändring per spänningsändring, ekvation (2).

$$\sigma' = \sigma - p \quad (1)$$

$$k_n = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta b} \quad (2)$$

Sprickors normalstyvhet (vinkelrätt mot sprickytan) har behandlats tidigare, i t.ex. Bandis, et al., (1983) och Goodman, (1974). Dessa tar fram sprickstyvheter genom att mäta hoptryckning av prover, se Figur 1a. Initiiellt fås en stor sprickstängning, d v s deformation vid liten spänningsökning; detta mindre styva stadium kallas här stadium B och den styvare delen kallas stadium A. Om sådana försök körs i flera cykler uppvisar resultaten en hystereseffekt. Rutqvist, (1995) använder hydrauliska tester för att bestämma sprickstyvhet i fält. Vidare presenterar Fransson, et al., (2010) en metod för att utvärdera sprickstyvhet och deformation ur hydrauliska tester i kombination med injekteringsdata.

I detta arbete har fältmätningar genomförts och sprickstyvheter utvärderas både via uppmätta deformationer och via hydrauliska tester samt injekteringsdata. Det styvare beteendet (A i Figur 1) hos en spricka med många kontaktpunkter fås då i början av testet. Ett samband mellan magasinskoefficient, S , och transmissivitet, T , framtaget för det kristallina berget i Äspö, (3) (Rhén et al., 2008) kombineras i Fransson, (2009) med ett samband mellan sprickstyvheter, k_n , och magasinskoefficient (4) (Doe & Geier, 1990) och samband (5) fås. Transmissiviteten här approximeras som $Q/\Delta h$, i enlighet med Fransson, (1999).

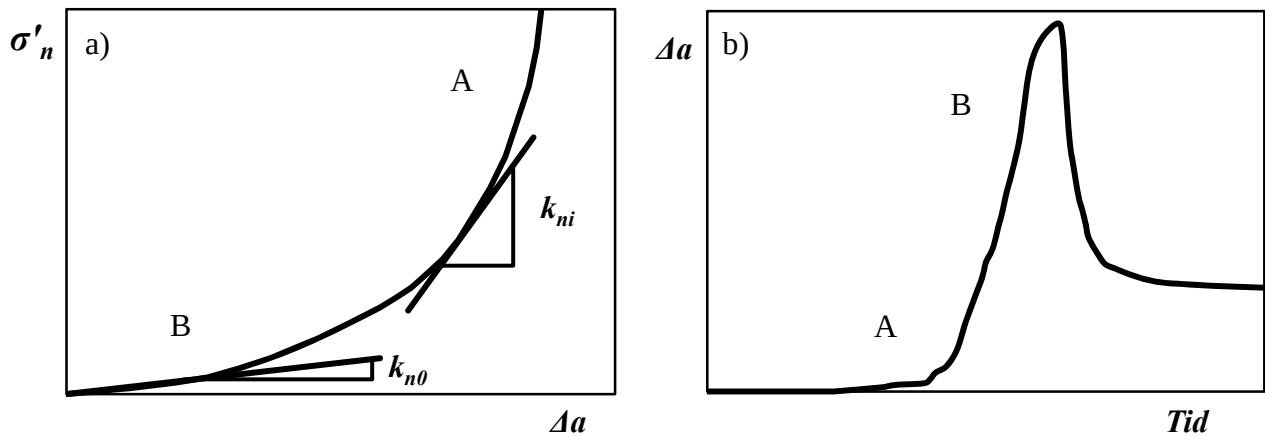
$$S = 0.0109T^{0.71} \quad (3)$$

$$S = \rho_f g \left(\frac{1}{k_n} \right) \quad (4)$$

$$k_n^S = \frac{\rho_f g}{0.0109T^{0.71}} \quad (5)$$

En ökning av portrycket, Δp , minskar effektivspänningen och kan därmed vidga sprickan. En viddförändring kan antingen kvantifieras som uppmätt fysisk deformation, Δa , ekvation (7) eller ändring i hydraulisk vidd, Δb , ekvation (8), där hydrauliska viddar utvärderas enligt kubiska lagen, (Snow, 1968) ekvation (6).

$$b = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \mu \cdot T}{\rho \cdot g}} \quad (6)$$



Figur 1: a) En sprickstängningskurva (avritad från Rutqvist & Stephansson, 2003)

b) En deformationsgraf från denna studie; sprickan separeras genom ökat portryck.

Figure 1: a) A traditional closure curve (redrawn from Rutqvist & Stephansson, 2003).

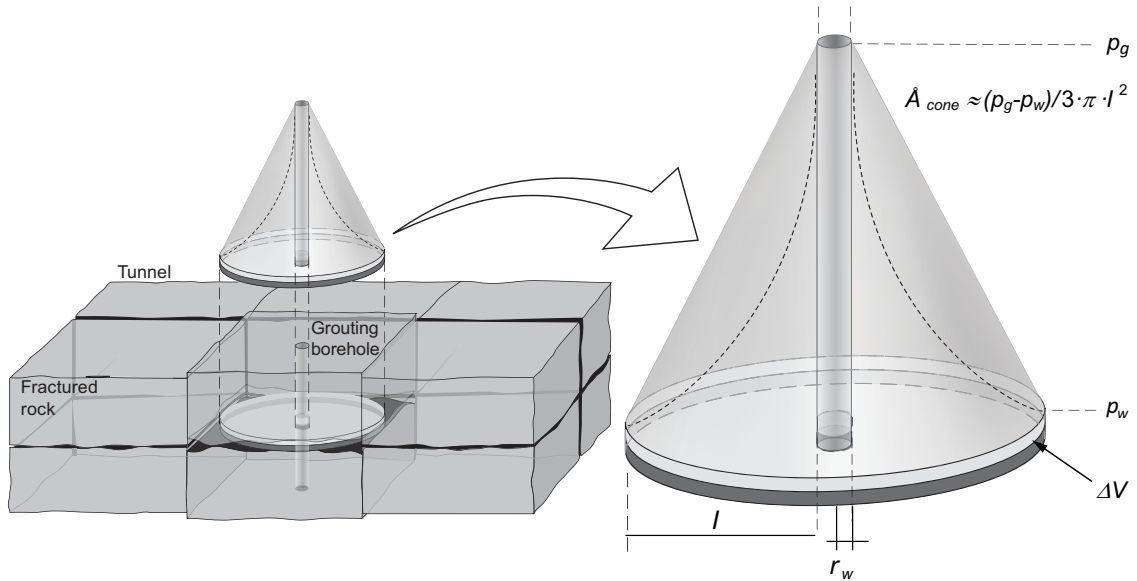
b) A deformation curve from this study, where a fracture is separated with increased pore pressure.

Fransson, et al., (2010) approximerar att injekteringstrycket avtar linjärt med avståndet från borrhålet, se Figur 2. Om ett 2D (radiellt) flöde är fallet kommer tryckprofilen i sprickplanet likna en kon. Medeltrycket hos en sådan profil är $\Delta p/3$, vilket har använts för att beräkna sprickstyvheter från ändrad hydraulisk och fysisk vidd enligt ekvation (7) och (8). I ekvation (9) presenteras översiktligt den formel som används för styvhetsberäkningar enligt Fransson, et al., (2010). $\dot{A}$ är ett uttryck för areaintegralen av portrycksförändringen (Fransson, et al., 2007). ΔV är volymförändringen av sprickan, som beräknas genom ett hydrauliskt test före; och bruksåtgång under injektering.

$$k_n^a = \frac{\frac{\Delta p}{3}}{\Delta a_2 - \Delta a_1} \quad (7)$$

$$k_n^b = \frac{\frac{\Delta p}{3}}{b_2 - b_1} \quad (8)$$

$$k_n^{\dot{A}} = \frac{\dot{A}}{\Delta V} \quad (9)$$

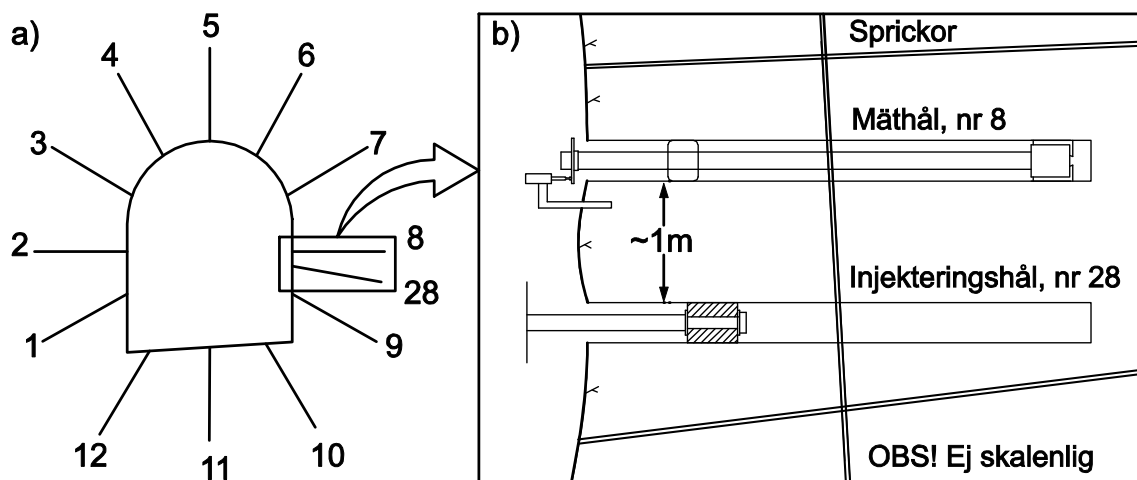


Figur 2: Konceptuell beskrivning av bruksinträngning och deformation (modifierad från Fransson, et al., (2010) Indata är ursprunglig hydraulisk apertur, ändring i tryck (kraft) och injekterad volym.

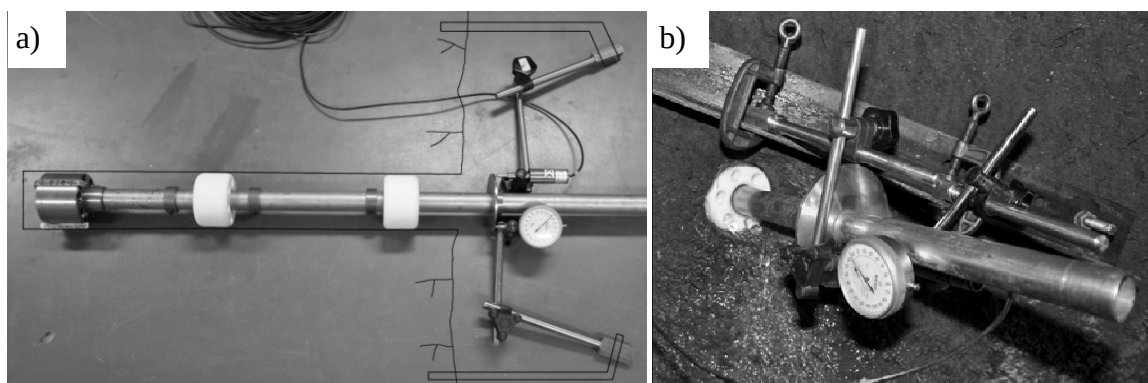
Figure 2: Conceptual sketch of grout penetration and fracture deformation (modified from Fransson, et al., (2010) Input data is initial hydraulic aperture, change in overpressure (force) and grouted volume.

MÄTMETOD

Mätningar av ändring i fysisk vidd utfördes genom att mäta lägesförskjutningar mellan en punkt i ett borrhål (nr 8) och väggen utanför hålet, se Figur 3. Mätningarna fortlöpte under tiden som närliggande borrhål injekterades, först via vattenförlustmätningar i borrhål (BH) 28, se Figur 3, sedan vid injekteringen av BH9, BH28 och BH7. Mätutrustningen presenteras schematiskt i Figur 4 och är uppbyggd enligt följande: Ett stålrör är monterat på ett ankare, som spänns ut mot borrhålsväggen. Stången centreras i borrhålet med hjälp av teflonbussningar. På den del av stången som sticker ut ur borrhålet sitter en skiva, som lägesgivare ligger emot. Givarna bultas i tunnelväggen invid hålet.



Figur 3 a) Borrhålsgeometrin för skärmen i Hallandsås. b) skiss över mätprincipen.
 Figure 3: a) Borehole geometry of the grouting fan in Hallandsås tunnel. b) Principal sketch of deformation measurement.



Figur 4: a) Deformationsmätutrustningen schematiskt upplagd. b) Utrustningen monterad i BH8, Hallandsås.
 Figure 4: a) Equipment schematically arranged. b) Equipment installed in BH8, Hallandsås tunnel.

Med denna uppställning mättes summan av de deformationskomposanter som var i linje med röret. Två givare användes, där den ena är en mätlocka med en upplösning på 1 μm och den andra är en elektrisk LVDT-givare med en upplösning på ungefär 1,6 μm . Värden från denna givare loggades per sekund, och data exporterades till Excel för vidare behandling. De båda givarna visade god överensstämmelse med varandra.

RESULTAT

Här presenteras uppmätta deformationer från försöken i Hallandsås. Varje graf i Figur 5 motsvarar ett vattenförlusttest i BH28. Kurvorna representerar uppmätt fysisk deformation, Δa , ändring i hydraulisk vidd för pumpflödet, Δb , och en generalisering av pumpövertrycket, Δp .

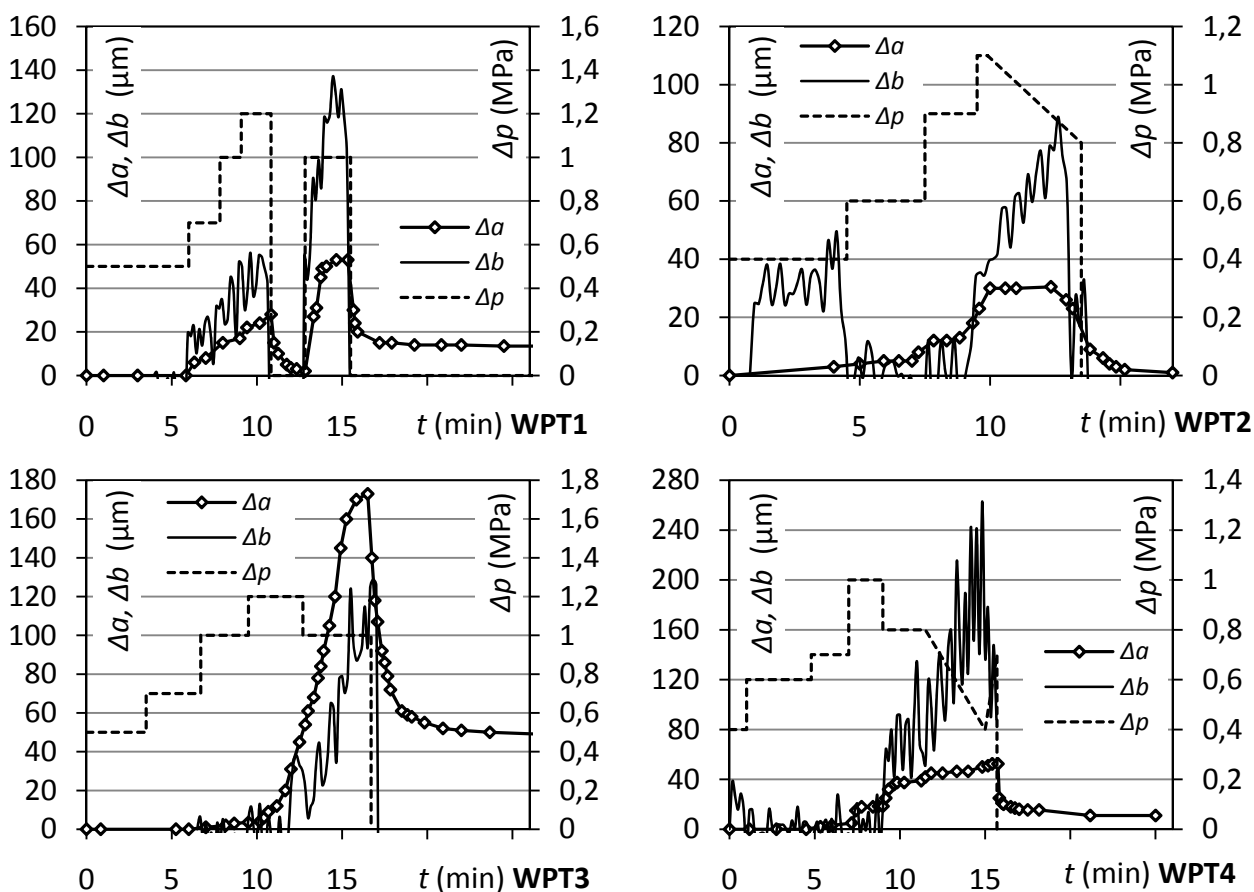
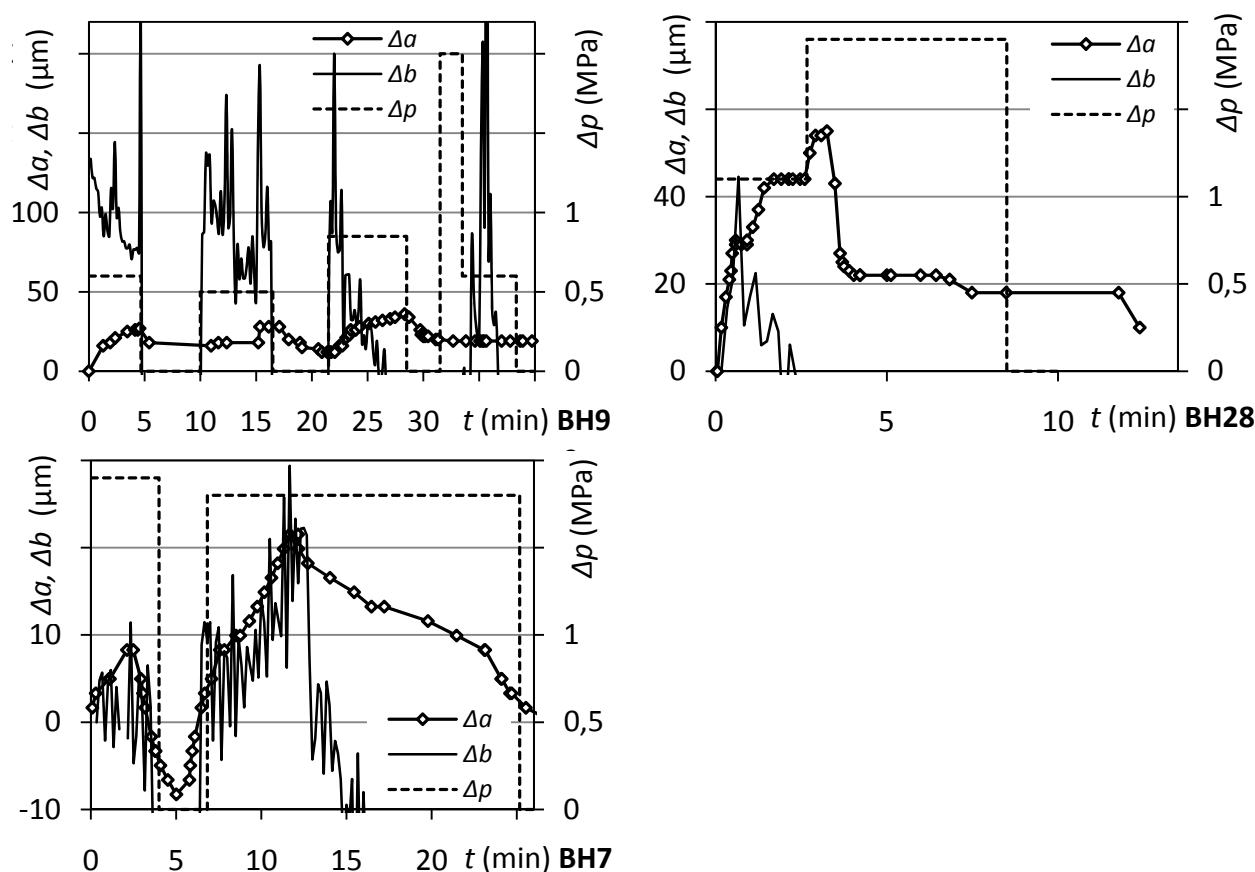


Figure 5: Uppmätt deformation, Δa , ändring av hydraulisk vidd, Δb , samt pumpövertryck, Δp , för de fyra vattenförlustmätningarna som utfördes i BH28.
 Figure 5: Measured deformation, Δa , change in hydraulic aperture, Δb , and pump overpressure for the four water pressure tests conducted in BH28.

I Figur 6 presenteras injekteringen av BH9, BH28 och BH7 på samma vis. Här har antagligen brukets gelände påverkat resultaten. I Tabell 1 finns värden på uppmätta fysiska deformationer i Hallandsås vid vattenförlustmätningar (WPT) och injektering (G). Under testen uppnåddes både resultat med återgående deformation (WPT2 i Figur 5) och med delvis kvarstående deformation (WPT1, WPT3 och WPT4 i Figur 5). Vid WPT4 var mätutrustningen förankrad på ett djup av 2,0 m, i övriga test 4,5 m. Vid 2,1 m fanns en större spricka, som stod för en betydande del av inflödet till hålet.



Figur 6: Uppmätt deformation, Δa , ändring av hydraulisk vidd, Δb , samt pumpöverttryck, Δp , för injekteringen av BH 9, 28 och 7.

Figure 6: Measured deformation, Δa , change in hydraulic aperture, Δb , and pump overpressure for the grouting of BH 9, 28 and 7.

Tabell 1: Permanenta och återgående deformationer uppmätta i Hallandsås.

Table 1: Permanent and resilient deformations of the Hallandsås measurements.

Test	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4	G-BH9	G-BH28	G-BH7
Avstånd till BH8 (m)	1	1	1	1	4	1	4
Permanent a (μm)	14	0	48	11	19	18	0
Återgående a (μm)	39	31	125	42	17	37	30
Total a (μm)	53	31	173	53	36	55	30

ANALYS

Från dataloggern på injekteringspumpen som användes för vattenförlustmätningar och injektering kom *pvt*-data; momentantryck, (p), total pumpad volym, (v), och momentanflöde för tiden (t) var tionde sekund. *pvt*-data synkroniserades med deformationsloggern varpå beräkningar utfördes. Transmissivitet utvärderas som pumpflöde/pumpöverttryck; $Q/\Delta h$, och hydraulisk vidd, b , enligt kubiska lagen (6). Viskositeten μ , sattes till $1.3 \cdot 10^{-3}$ Pas för vatten och $5.5 \cdot 10^{-3}$ Pas för ogelad silica sol, densiteten, ρ , sattes till 1000 kg/m^3 för vatten och 1300 kg/m^3 för silica sol. För deformationsgraferna sattes intervall där stadium A och B definierades, se Figur 1b och utifrån transmissivitet, hydraulisk vidd och uppmätt deformation i respektive stadiums ändlägen beräknades sprickstyvheter enligt (5), (7) och (8). En sammanställning av dessa utvärderingar för Hallandsås finns i Tabell 2. För Göteborgstunneln har sprickstyvheter baserade på ändring i hydraulisk vidd och magasinskoefficient beräknats från utförda tester, Tabell 3. Sprickstyvheter enligt ekvation (9) har utvärderats för de tre injekterade hålen i Hallandsås till 1, 3 och 70 GPa/m, se Figur 7a. En detaljerad beskrivning av analysmetoden finns i Fransson et al. (2010). I Figur 7b plottas uppmätta fysiska deformationer, Δa , mot ändring i hydraulisk vidd, Δb . De kvarstående deformationerna, samt att deformationer erhöles vid så pass låga tryck kan kanske förklaras med inverkan av skjuvspänningar.

Tabell 2: Sammanställning av styvhetsberäkningar för Hallandsås. Siffrorna 1 och 2 för b och k_n^S avser början och slutet på det intervall som använts för utvärderingen.

Table 2: Compilation of calculated stiffness data from the Hallandsås tunnel. The index numbers 1 and 2 for b and k_n^S refer to start and end of the interval for which the stiffness is evaluated.

BH Test	Stadium	Δp	b_1	b_2	ΔE	k_n^b	k_n^a	$k_n^S,1$	$k_n^S,2$
		Enhet: (MPa)	(μm)	(μm)	(μm)	(GPa/m)	(GPa/m)	(GPa/m)	(GPa/m)
		Ekvationsnummer: -	(6)	(6)	-	(8)	(7)	(5)	(5)
28 WPT	A	0,9	110	128	- ^a	16	- ^a	19	13
	B	1,2	138	236	- ^a	4,1	- ^a	11	3,7
28 WPT	A	0,8	231	272	28	6,6	9,6	3,8	2,7
	B	1,0	266	317	53	6,8	6,5	2,8	1,9
28 WPT	A	0,3	292	320	5	4,0	23	2,3	1,9
	B	0,8	296	316	25	14	11	2,3	2,0
28 WPT	A	1,0	202	209	4	45	79	5,1	4,7
	B	1,0	209	292	125	3,9	2,6	4,8	2,3
28 WPT	A	0,6	247	250	5	52	37	3,3	3,2
	B	0,8	220	325	32	2,6	8,6	4,3	1,8
9 Injekt.	B	0,4	470	417	27	(-2,5)	4,9	- ^b	- ^b
28 Injekt.	B	0,9	283	314	45	9,4	6,6	- ^b	- ^b
7 Injekt.	B	1,4	51	119	25	6,8	19	- ^b	- ^b

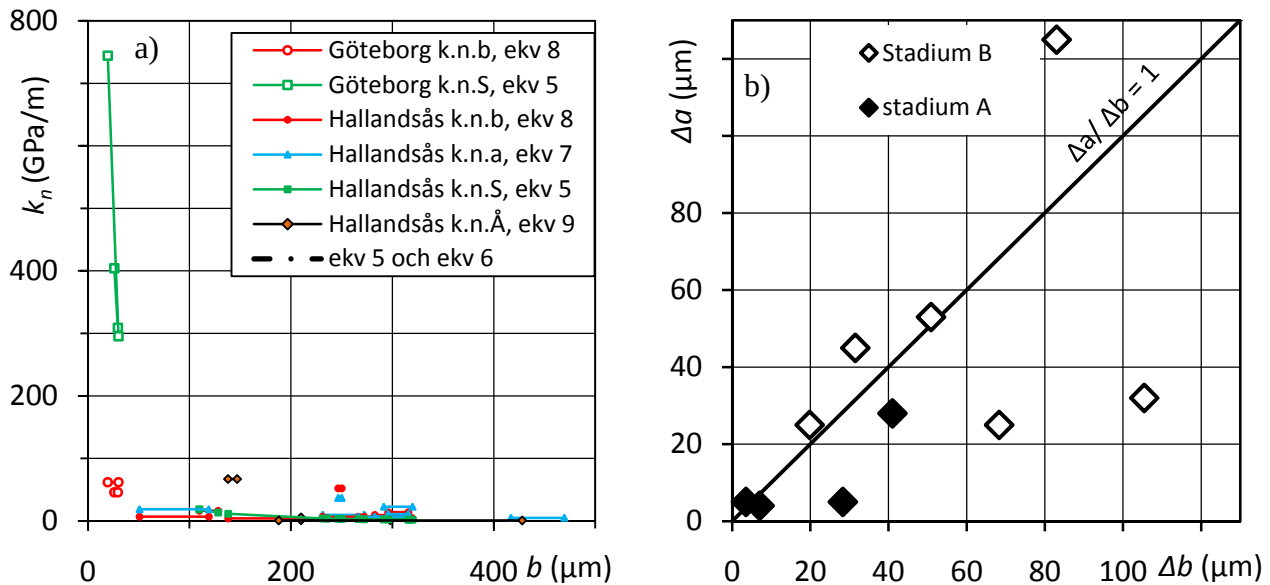
^a Tryck loggades istället för deformation /Pressure logged instead of deformation

^b Endast giltig för vatten /Only valid for water

Tabell 3: Sammanställning av sprickstyvhetsdata för tunneln i Göteborg.

Table 3: Compilation of fracture stiffness data from the Gothenburg tunnel.

BH	Test	Δp	b_1	b_2	k_n^b	$k_n^{S,1}$	$k_n^{S,2}$
		Enhet: (MPa)	(μm)	(μm)	(GPa/m)	(GPa/m)	(GPa/m)
		Ekvationsnummer: -	(6)	(6)	(8)	(5)	(5)
KBH2	WPT	0,5	26	29	46	404	309
KBH3	WPT	2,0	19	30	62	744	296



Figur 7: a) Sammanställning av hydraulisk apertur och normalsprickstyvhetsdata (värden från Tabell 2 och Tabell 3). Data från Hallandsås resulterar i styvheter på mellan 1 och 70 GPa/m vid utvärdering enligt ekvation (9). b) Fysisk viddändring mot hydraulisk viddändring för de olika testernas styvhetsstadier.

Figure 7: a) Compilation of hydraulic aperture and normal stiffness (values from Table 2 and Table 3). Data from Hallandsås result in stiffness in the range of 1 – 70 GPa/m when evaluated according to equation (9). b) Crossplot of physical aperture change and hydraulic aperture change, for the stiffness stages defined for the various tests.

SLUTSATSER

Deformationsmätningar med metoden som presenteras ovan är enkla och billiga att genomföra, och ger indata till olika sprickstyvhetsutvärderingar på olika sätt, som alla visar på resultat i linje med fältundersökningar (se exempelvis Fransson, 2009). Deformationer i Hallandsås kunde mätas redan vid de låga tryck som användes i efterinjekteringen. Både permanenta och återgående deformationer uppmättes, där de permanenta kan vara skjuvdeformationer. Generellt är sprickstyvheten lägre i Hallandsås än i den mer inspända Göteborgstunneln.

SLUTORD

Tack till Edward Runslätt, som var andra halvan av examensarbetet vari föreliggande mätningar utfördes, Johan Funehag och Gunnar Gustafson för handledning och examinering av detsamma, samt till SKB för finansiering av detta skrivarbete.

REFERENSER

- Bandis, S. C., Lumsden, A. C., & Barton, N. R. (1983). Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(6), 249-268. doi: 10.1016/0148-9062(83)90595-8
- Doe, T. W., & Geier, J. E. (1990). Interpretations of Fracture System Geometry Using Well Test Data SKB Stripa Project TR 91-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fransson, Tsang, C. F., Rutqvist, J., & Gustafson, G. (2010). Estimation of deformation and stiffness of fractures close to tunnels using data from single-hole hydraulic testing and grouting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(6), 887-893. doi: 10.1016/j.ijrmms.2010.05.007
- Fransson, Å. (1999). Grouting Predictions Based on Hydraulic Tests of Short Duration: Analytical, Numerical and Experimental Approaches. Licentiatavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg
- Fransson, Å. (2009). Literature survey: Relations between stress change, deformation and transmissivity for fractures and deformation zones based on in situ investigations. SKB R-09-13, Svensk Kärnbränslehantering AB
- Fransson, Å., Tsang, C. F., Rutqvist, J., & Gustafson, G. (2007). A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(7), 1011-1021. doi: 10.1016/j.ijrmms.2007.02.007
- Goodman, R. E. (1974). The mechanical properties of joints. *Proceedings of the 3rd Int. Congr. International Society of Rock Mechanics*, Denver, Colorado.
- Rhén, I., Forsmark, T., Hartley, L., Jackson, P., Roberts, D., Swan, D., & Gylling, B. (2008). Hydrogeological conceptualisation and parameterisation, Site descriptive modelling SDM–Site Laxemar, SKB R-08-78, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Runslätt, E., & Thörn, J. (2010). Fracture deformation when grouting in hard rock: In situ measurements in tunnels under Gothenburg and Hallandsås. Masterexamensarbete, Chalmers tekniska högskola, Göteborg. Tillgänglig: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/126954.pdf>
- Rutqvist, J. (1995). Determination of hydraulic normal stiffness of fractures in hard rock from well testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 32(5), 513-523. doi: 10.1016/0148-9062(95)00039-j
- Rutqvist, J., & Stephansson, O. (2003). The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. *Hydrogeology Journal*, 11(1), 7-40. doi: 10.1007/s10040-002-0241-5
- Snow, D. T. (1968). Rock fracture spacings, openings and porosities. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 94(SM1), 73-79.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. New York: Wiley