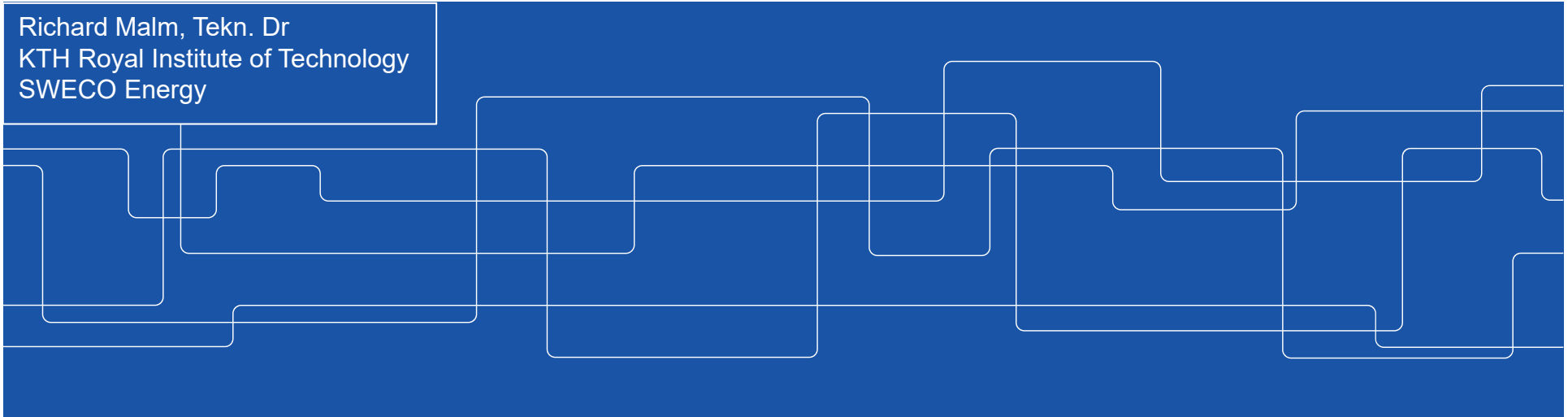




Instrumentering och utvärdering av fullskaleförsök av betongplugg för slutförvar av kärnbränsle

Kraftindustrins betongdag 2019-03-13

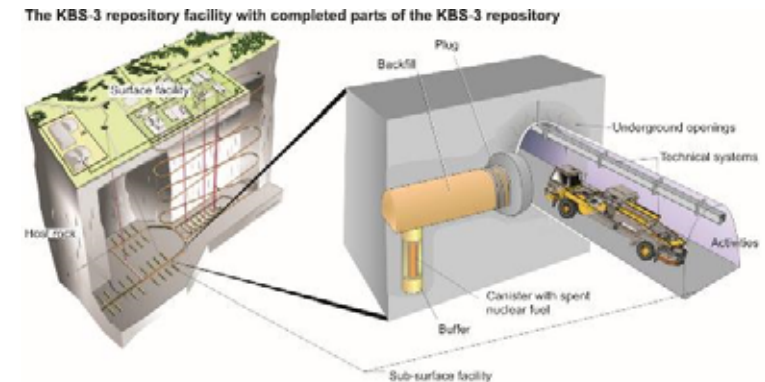
Richard Malm, Tekn. Dr
KTH Royal Institute of Technology
SWECO Energy





Bakgrund

Det svenska slutförvaret för kärnbränsle planeras av SKB och avses att deponeras i Forsmark, ca 500 m under marken.



SKBs KBS-3V metod för deponering:

- Kärnbränslet placeras i kopparkapslar med gjutjärnsinsats.
- Placeras (omslutna i bentonit) i vertikala deponeringshål (~6 m avstånd) i ~ 300 m långa deponeringstunnlar
- Deponeringstunnlarna återfylls med bentonitmaterial
- Deponeringstunnlarna försluts med pluggar (temporär försegling)
- Efter detta återfylls även anslutande stamtunnlar med bentonit.



Planerade slutförvaret



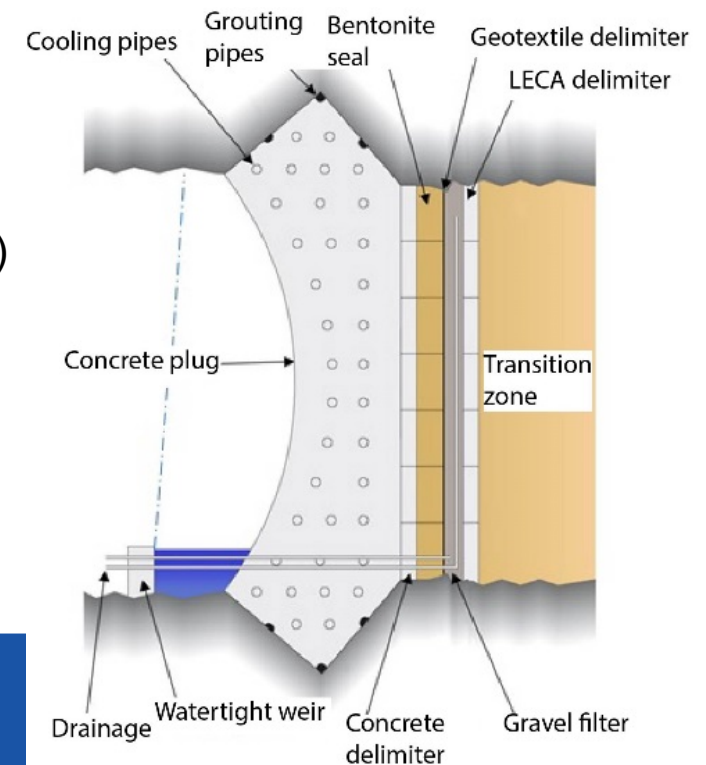
SKBs referensdesign av plugg

Försegling av deponeringstunnlar sker med en pluggkonstruktion

- Avslutande återfyllnad (bentonit)
- LECA balkar + makadam filter
- Bentonit tätning
- Avskiljande betongbalkar
- Betongkupol (*valvplugg* eller *betongplugg*)

Oarmerad betongkupol

- Självkompakterande, låg pH betong
- Avancerad kylningsekvens

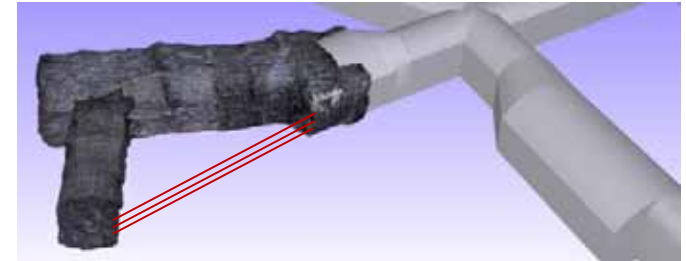




DOMPLU fullskaleförsöket i Äspö

Fullskaleförsök i Äspölaboratoriet (2013 – 2018)

- Kylsekvens i tre steg
 - a) Reducera hydratationsvärme ($T < 20\text{ °C}$)
 - b) Tvinga betongen att släppa från berget
 - c) Före kontaktingjektering
- Trycksättning 4 MPa (3 år)
- Gastäthetstest
- Trycksättning 8 MPa





Syfte med instrumentering av betongplugg

Övervaka påkänningar i betongpluggen under gjutning, trycksättning samt pga långtidseffekter

Validera dimensioneringsförutsättningar och tidigare beräkningsmodeller

Utvärdera betongpluggens prestanda och skapa underlag för framtida uppdateringar av referensdesignen

- Formtryck pga självkompakterande betong
- Kylsekvansens inverkan
- Analysera om det går att bryta vidhäftningen med kylning (innan kontaktingjektering)
- Påverkan vid långvariga och höga tryckbelastningar



Instrumentering betongpluggen

62 givare installerades för att övervaka betongpluggen

Formtryck

- 5 Wika S11

Förskjutning mellan berg och betong

- 6 TML joint meters type KJA-A

Förskjutning av betongpluggen

- 3 LVDT HBM type WA

Ingjutna töjningsgivare

- 14 TML type KM-AT (töjn. & temp.)
- 10 TML type KM-A (töjn.)
- 4 Geokon 4200 (töjn. & temp.)

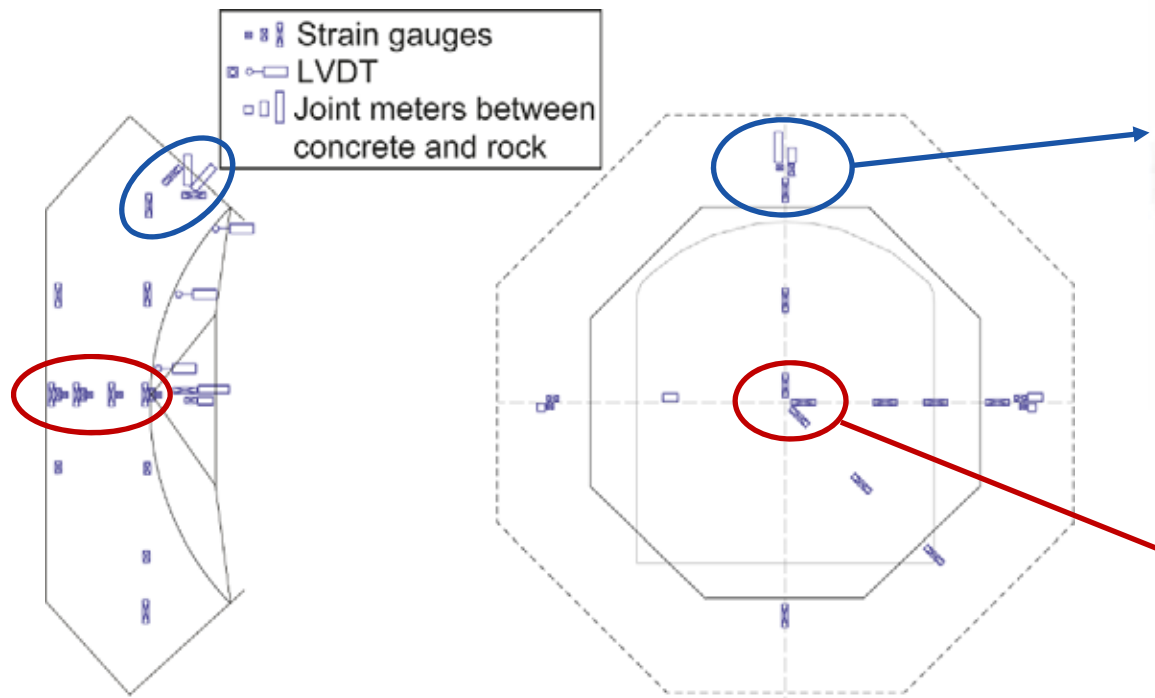
Omgivande lufttemperatur

- 2 PT 100



Redundans både avseende fabrikat och till givarplaceringar

Instrumentering av betongpluggen



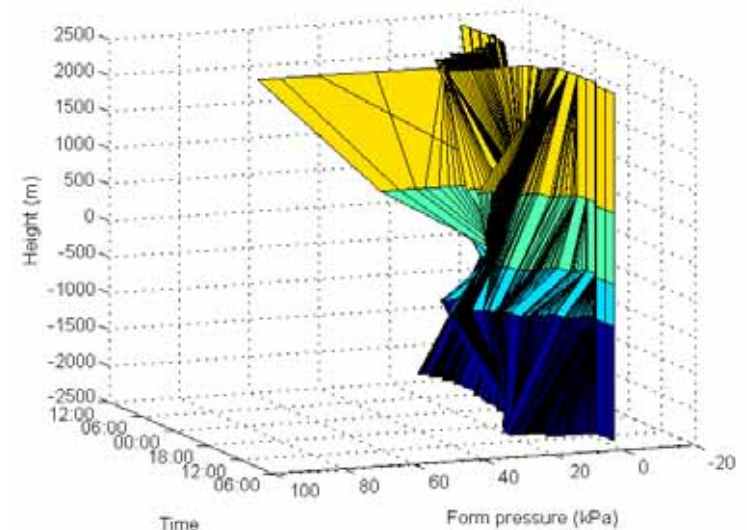
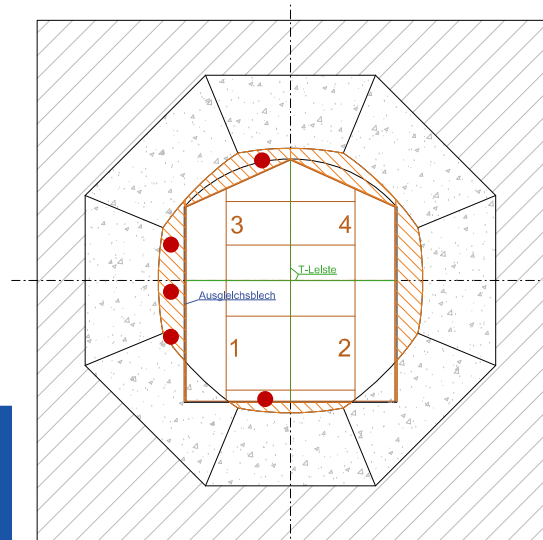


Formtryck

Formtrycket vid självkompakterande betong är högre än vid konventionell betong.

→ Mycket kraftig form

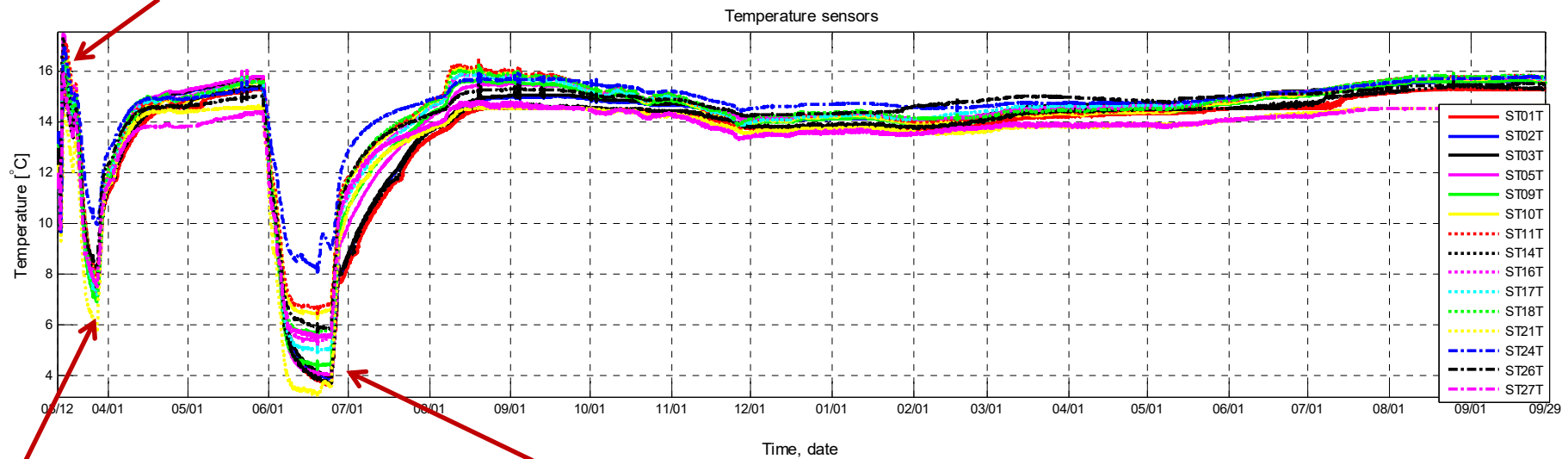
- Syfte; analysera verkligt formtryck





Kylsekvens

A) Kylning under härdning $T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (reducera termiska spänningar)



B) Kylning för att bryta vidhäftning

C) Kylning före kontaklinjektering (skapa termisk förspänning)



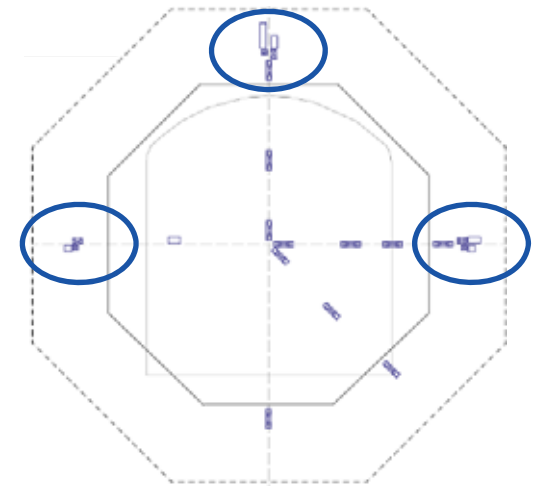
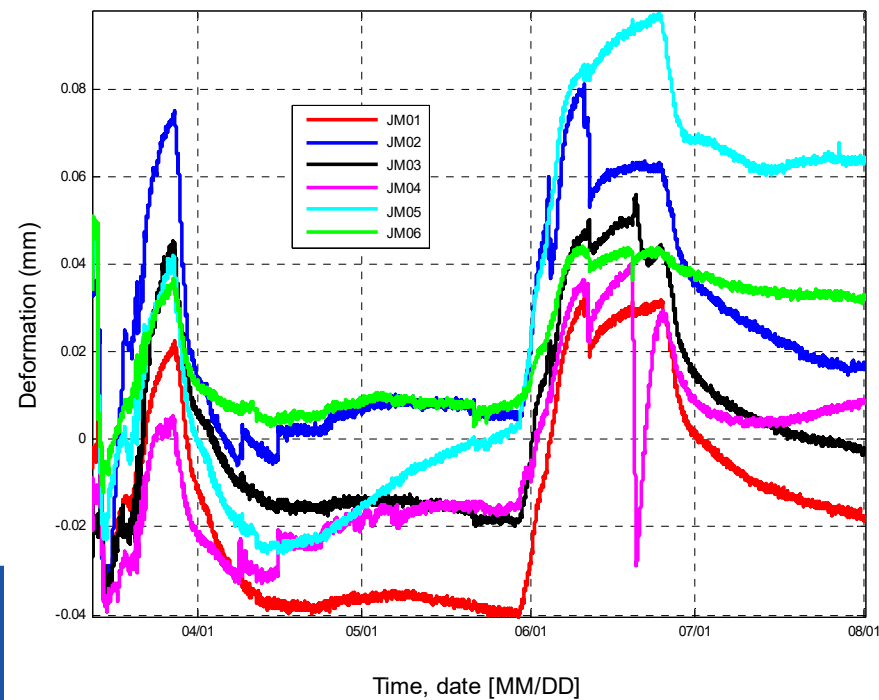
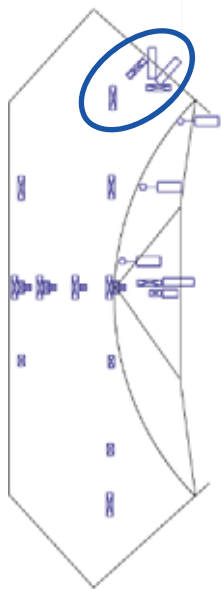
Termisk förspänning

- Tanken med att tvinga betongpluggen att släppa från berget är för att
 - minimera sprickrisken pga krympning (hög autogen krympning)
 - Reducera framtida sprickrisk genom att orsaka termisk förspänning av betongpluggen (kylning innan injektering)
 - Förväntad termisk förspänning $\sim 4,5$ MPa
- Fokus på denna presentation är att utvärdera effekten från kylsekvensen (släppa från berget och den termiska förspänningen) baserat på mätningarna
- Temperaturen reducerades från $14 - 16$ °C till ca $3 - 8$ °C precis före kontaktingjekteringen.
- Om betongpluggen hade släppt vid den tidigare kylningen så hade denna kylning reducerat i en spalt på flera millimeter.



Relativ förskjutning i spalten

Joint-meters mäter den relativa förskjutningen mellan betong och berg
Visar relativt små förskjutningar < 0.1 mm före injektering

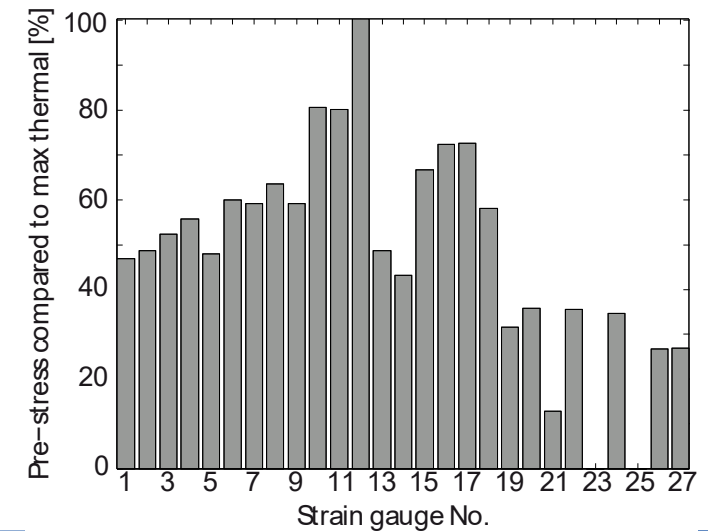
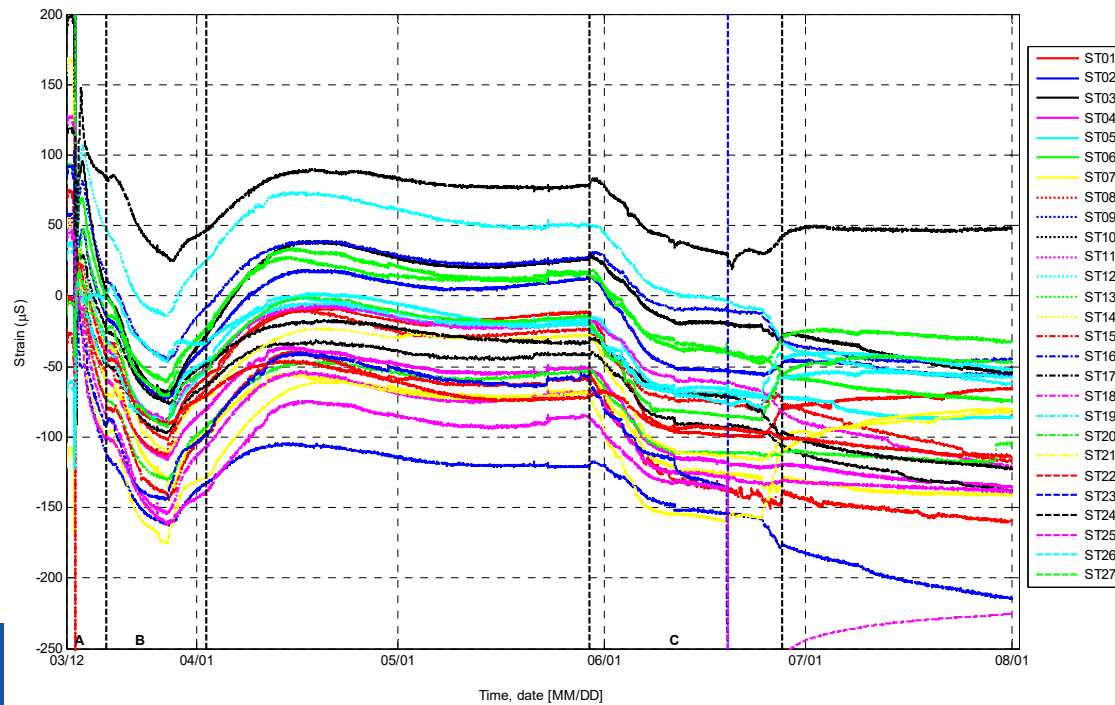




Effektiv termisk förspänning

Skillnad i töjning före kylning och efter kontaktingjektering i relation till förväntad töjning pga temperaturskillnad

$$\Delta = \frac{\varepsilon_{cooling} - \varepsilon_{grouting}}{\varepsilon_{\Delta T}}$$



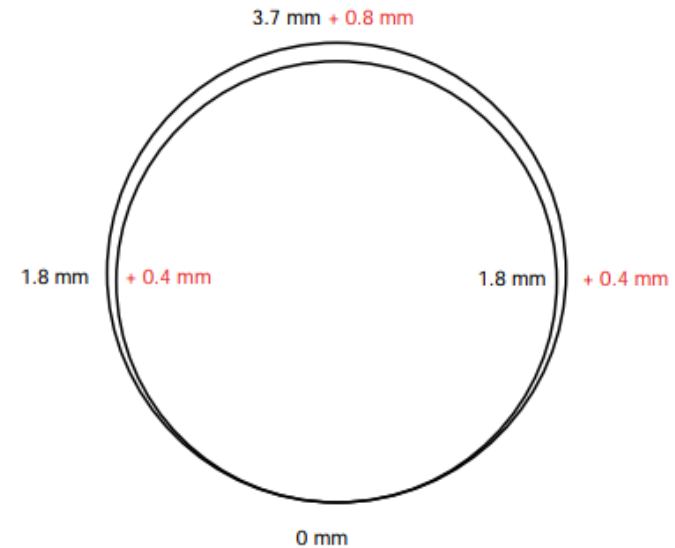


Spaltvidd

Om pluggens släpptes mot berget skulle en relativt stor spalt uppstå.

Mätningarna visade dock att detta inte var fallet (åtminstone inte i närheten där givarna var installerade)

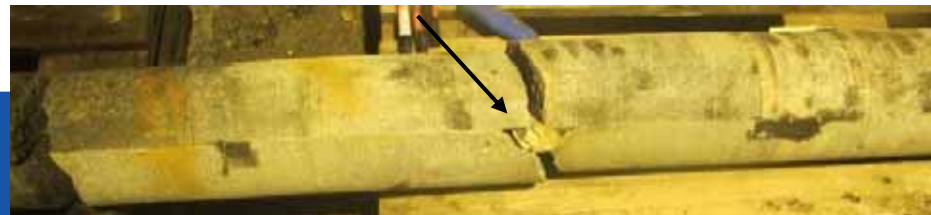
Detta bekräftades senare vid rivning, då injekteringsbrukets bredd kunde mätas vara mellan 0,2 och 0,7 mm.



Injektering



Injekteringsslang





Trycksättning

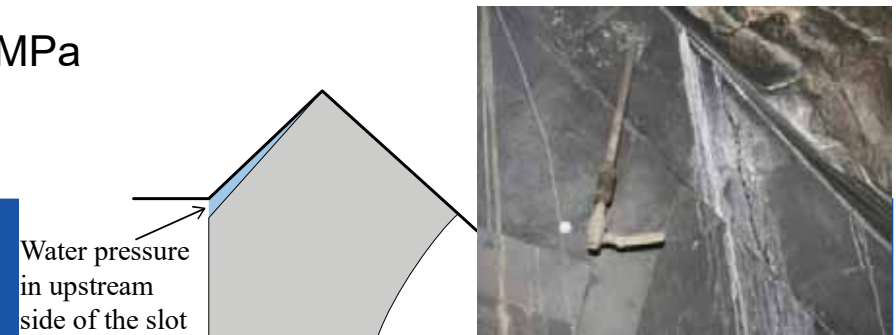
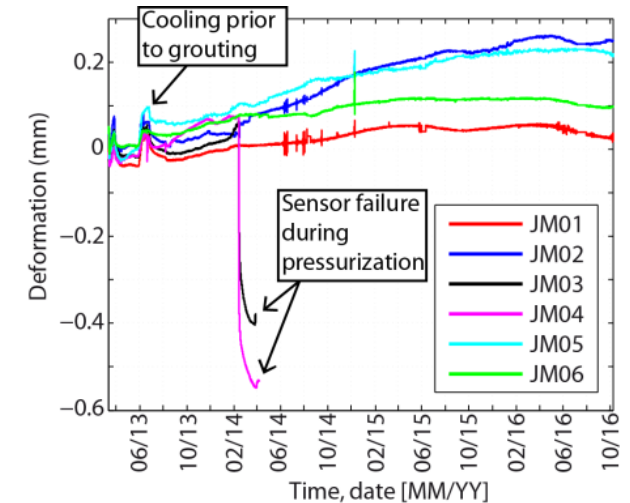
Tryckökning till 4 MPa (400 m vattenpelare)
som bibehölls i tre år (ökades slutligen till 8 MPa)

När ett tryck på 3,5 MPa uppnåddes, uppstod
signifikant tryck i joint-meters i toppen

- Troligt att uppströmsytan förlorade vidhäftning
- Totaltrycksgivare och töjningsgivare gick sönder i denna region
- Ett mindre läckage uppstod mellan berg och betong

Totalt läckage genom pluggen vid 4 MPa

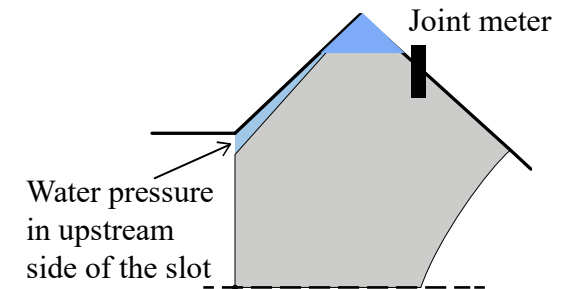
- 106 ml/min initialt
- 43 ml/min efter sex månader





Resultat från rivning

Vid rivning upptäcktes vattenfyllt hålrum i toppen av pluggen





Slutsatser

- Framgångsrikt fullskaleförsök av en oarmerad betongplugg bestående av låg-pH betong som utsattes för tuff belastning; 4 MPa vattentryck i långtidsförsök och 8 MPa i hållfasthetstest
 - Robust konstruktion med lågt läckage genom pluggen
- Instrumenteringen gav viktiga resultat som utgör underlag för framtida uppdateringar av konceptet, så som
 - Formtryck under gjutning
 - Inverkan från termisk påkänning
 - Samt påkänningar och deformationer i betongpluggen under driftförhållanden



Referenser;

Malm R. 2017. Evaluation of the Concrete Dome Plug DOMPLU – follow-up 2017. KTH, TRITA-BKN-Rapport 167. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1260868/FULLTEXT01.pdf>

Malm R. 2016. Evaluation of the Concrete Dome Plug DOMPLU – follow-up 2016. KTH, TRITA-BKN-Rapport 161. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1260865/FULLTEXT01.pdf>

Malm R. 2015a. Instrumentation and Evaluation of the Concrete Dome Plug DOMPLU. KTH, TRITA-BKN-Rapport 147. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1260859/FULLTEXT01.pdf>

Malm R. 2015b. Evaluation of the Concrete Dome Plug DOMPLU – follow-up 2015. KTH, TRITA-BKN-Rapport 156. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1260860/FULLTEXT01.pdf>

Grahm P, Malm R, Eriksson D. 2015. System design and full-scale testing of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels. Main report. Svensk kärnbränslehantering, SKB TR-14-23 <https://www.skb.se/publikation/2483956/TR-14-23.pdf>

Kristiansson A. 2014. Evaluation of a concrete plug: From the Dome Plug Experiment DOMPLU at Äspö HRL. KTH, TRITA-BKN-Examensarbete 418. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:730112/FULLTEXT01.pdf>

Malm R. 2012. Low-pH concrete plug for sealing the KBS-3V deposition tunnels. Svensk kärnbränslehantering, SKB R-11-04. <https://www.skb.se/publikation/2308086/R-11-04.pdf>



THANKS

Richard Malm

KTH Royal Institute of Technology / Sweco

richard.malm@byv.kth.se