

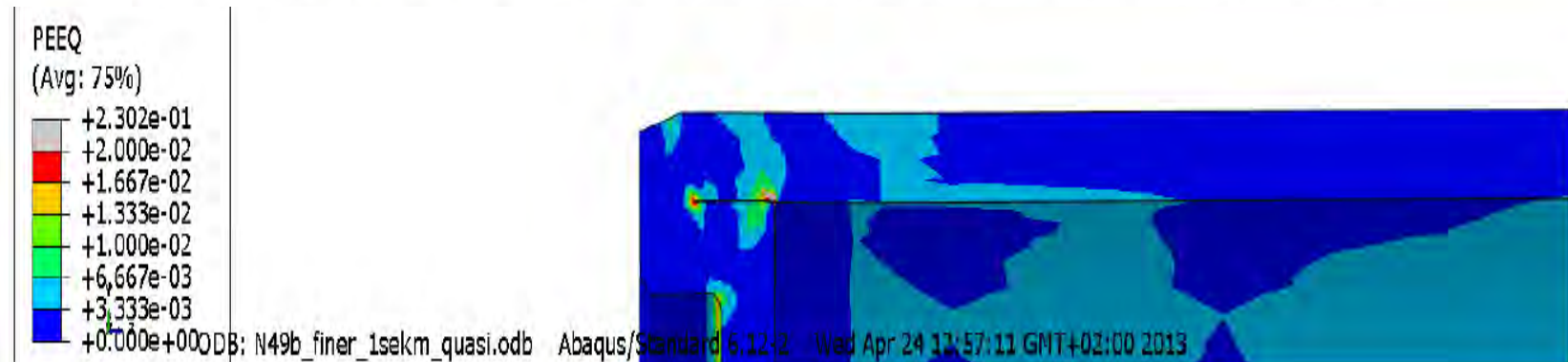
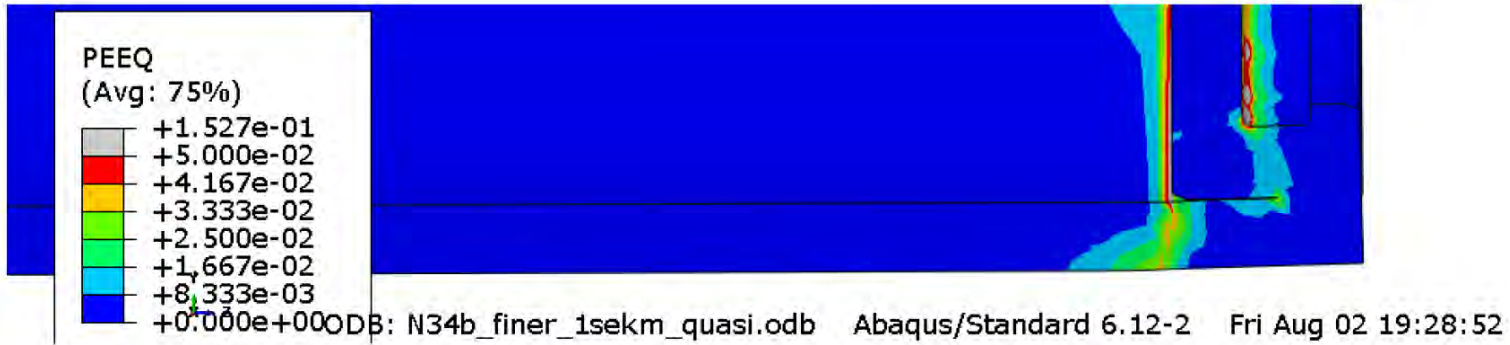


**Möte mellan SKB och SSM angående kompletteringar som berör
”kapselns mekaniska integritet”**

Stockholm

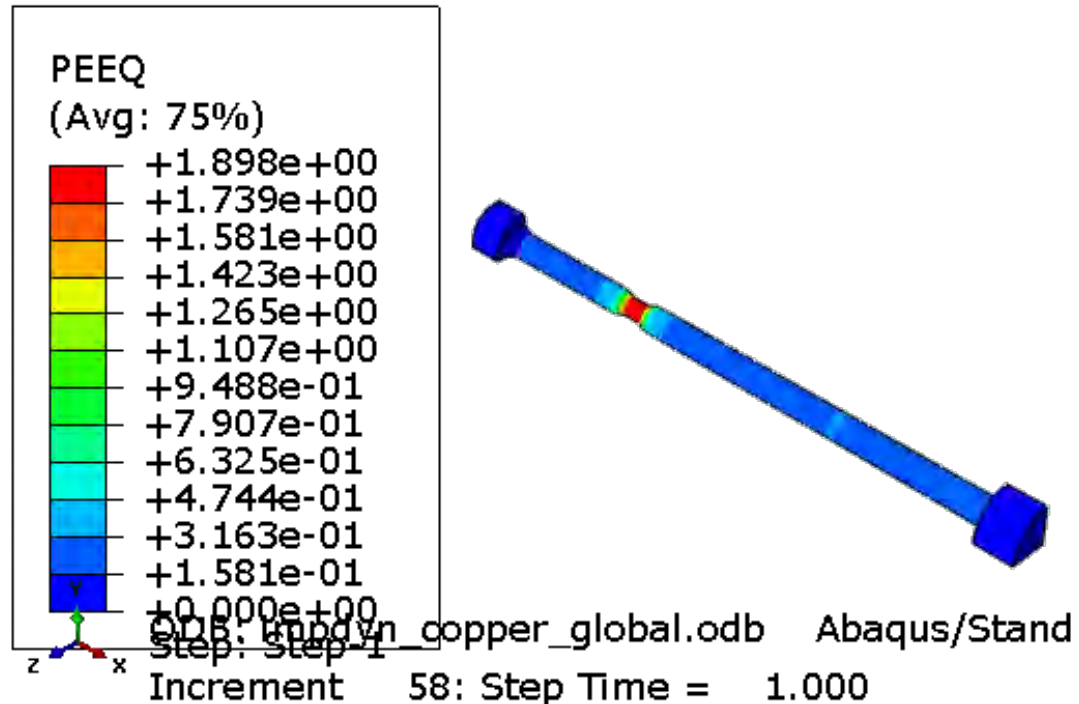
2013-08-28

Fråga nr 1, ”konsekvenser på kapselns mekaniska integritet vid skjuvning nära kapselns lock och botten” plastisk töjning i kapsel



- Vid skjuvning i kapselns kopparlock uppstår lokalt 15 % plastisk töjning men typiskt värde < 5%.
- Vid skjuvning i kapselns kopparbotten uppstår lokalt ca 23 % plastisk töjning men typiskt < 2%.

Fråga nr 1 , översiktsbild, simulering av dragprovning



- Simulering av dragprovning, det visas plastisk ekvivalent töjning (PEEQ).
- Konturplotten visas för sluttillståndet av simuleringen.
- Som framgår av figuren är den erhållna plastiska töjningen i midjan på staven mycket stor.

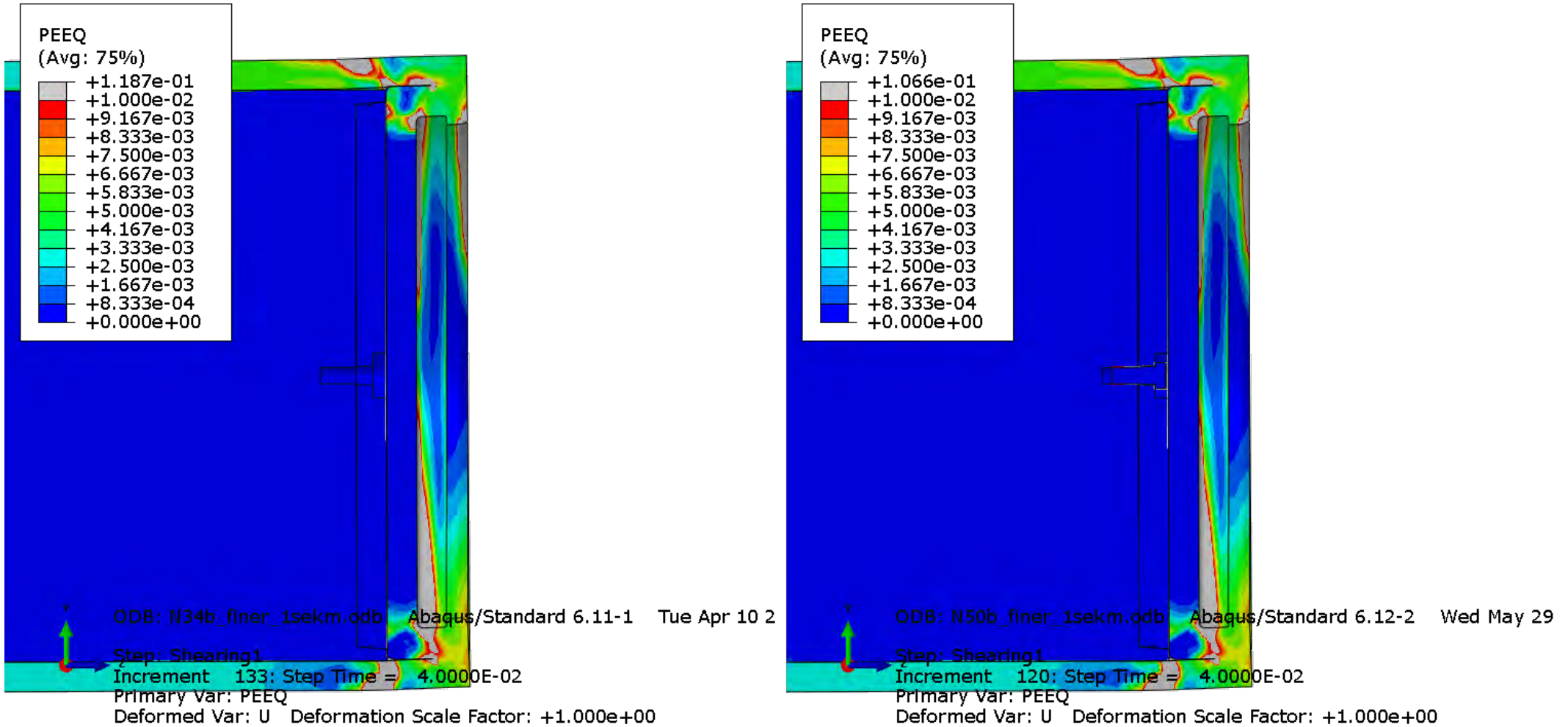
Fråga nr 1 , sammanfattning

- Lokalt erhålles sann plastisk töjning över 100 % i midjebildningen vid simulering av dragprovning av koppar.
- Vid beräkningar på kapseln med skjuvmagnituden 5 cm, bentonitdensiteten 2050 kg/m³ så blir den största plastiska töjningen hos kopparhöljet ca 23 % i botten och 15 % i toppen.
- De lokala töjningarna i kapseln är alltså avsevärt mindre än de töjningar som erhålles vid simulering av enaxlig dragprovning.

Fråga nr 2, det förenklade antagandet att insatsens stållock är en integrerad del av insatsen och inverkan på den mekaniska responsen

- FE-modellen har gjorts om så att stållocket modellerats som icke fastsvetsat i segjärnet.
- M30-skruven beskrivs genom att det ansätts en anliggningskraft mot segjärnet som motsvarar förspänningskraften i skruven.
- Ventilen och de organiska packningarna modelleras dock ej på grund av alltför stor komplexitet.
- Preliminära resultat vid skjuvplan som träffar stållocket, visar ej på några stora skillnader mellan beräkningsmodellerna med "fastsvetsat" respektive fastskruvat stållock.

Fråga nr 2, det förenklade antagandet att insatsens stållock är en integrerad del av insatsen och inverkan på den mekaniska responsen



- "Fastsvetsat" stållock till vänster, fastskruvat stållock till höger

Fråga nr 3, redovisning av hur hållfastheten för locket av stål i botten och toppen av insatsen påverkas av lastfallet skjuvdeformation i samband med jordbävning

- Det finns ett stållock endast i toppen på insatsen.
- Adekvata materialdata för kapseln ingående delar har använts i simuleringarna.
- Preliminära resultat vid skjuvplan som träffar stållocket, visar ej på några stora skillnader beroende på om stållocket är "fastsvetsat" eller fastskruvat. Stållocket utsätts i bägge fallen för små töjningar.

Fråga nr 4, redovisning av stöd för att kunna utnyttja de plastiska egenskaperna och brottegenskaperna i den utsträckning som nu görs för insatsen.

Säkerhetsfaktorer

- Den säkerhetsfaktor som används ($SFJ = 2$) motsvarar att skjuvlastfallet tillhör load level C/D (ASME Sect. XI). SKB ser över tillämpningen av ASME (enligt TR-10-28).

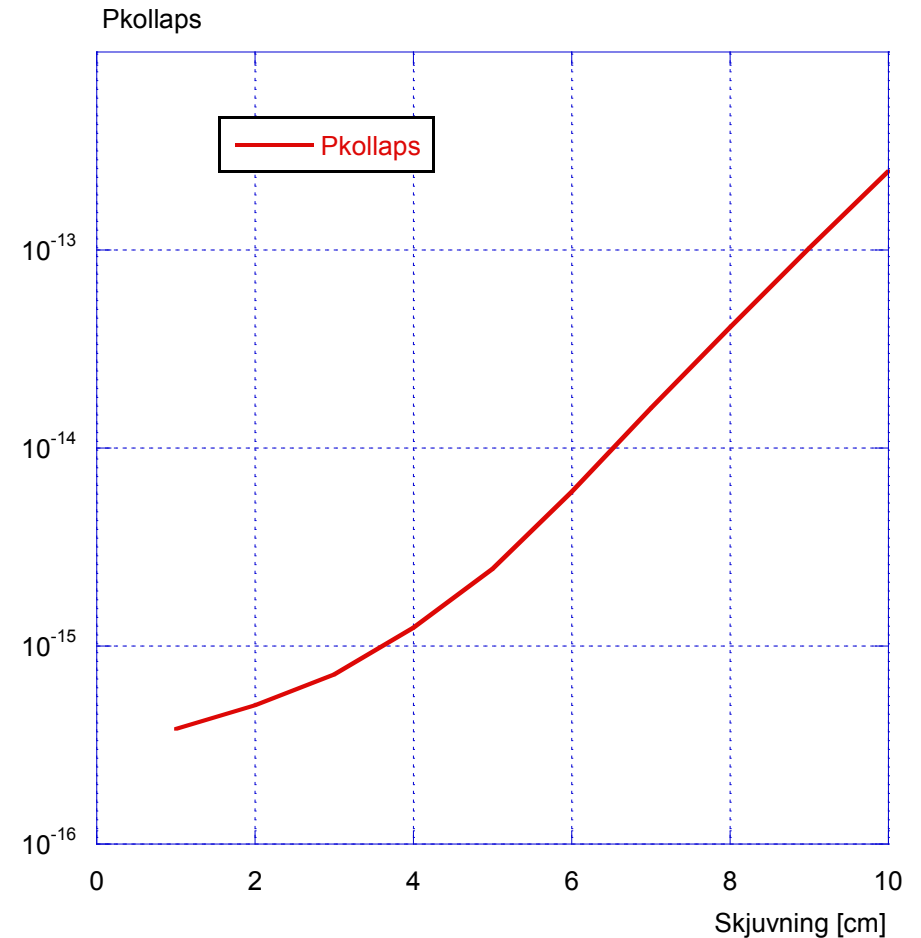
Risken för plastisk kollaps av insatsen har visats vara försumbar i en probabilistisk analys.

Brottsegheten i materialet har visats sig vara underskattad.

Gällande konstruktionsförutsättning tillåter en skada på insatsen dock med restriktioner angående kapselns fortsatta funktion.

Fråga nr 4, redovisning av stöd för att kunna utnyttja de plastiska egenskaperna

- Probabilistiska analysen av skjuvlastfallet BWR har resulterat i en låg sannolikhet för brott kopplat till ett kritiskt töjningsmått.
- Den låga sannolikheten för överskridande av tillåten töjning, motiverar användandet av säkerhetsfaktorn = 2.



Fråga nr 4,

- Brottseghetsprovning:

Framsteg har gjorts angående provningens genomförande.

Tidigare har provningen gjorts vid 0 grader i vattenbad. Jämförelse mellan luftatmosfär och vattenbad visar att vatten påverkar segjärnets brottseghet negativt.

- Betydelse av nya brottseghetsdata.

	BWR	PWR
J_{2mm} i skadetålighetsanalys	88 kN/m	78 kN/m
J_{2mm} prelimiärt från provning i gas	~120 kN/m	~143 kN/m

Fråga nr 5, ”redovisning av mekanistisk förståelse för hur fosfortillsatsen påverkar koppars krypduktilitet”

- I Sandström och Wu (2007) presenterades den ”double ledge model” som används för att belysa inverkan av fosfor på krypduktilitet
- Pettersson (2010) redovisade
 - högre korngränsglidning än vad Sandström och Wu (2007) utgick från
 - dock liten/ingen skillnad mellan Cu-OF och Cu-OFP
- Modelleringsarbetet har fortsatt:
 - den högre korngränsglidning som Pettersson (2010) redovisade har använts
 - skillnaden i korngränsglidning mellan Cu-OF och Cu-OFP kan inte förklaras med kavitetsmodellen (tillräcklig tid för diffusion av fosfor vid Petterssons provning ?)
 - nyligen publicerat i Sandström och Wu (2013)

Sandström och Wu, 2007, SKB TR-07-02

Pettersson, 2010, Journal of Nuclear Materials, 405 (2010) 131-137

Sandström och Wu, Influence of phosphorus on the creep ductility of copper, Journal of Nuclear Materials 441 (2013) 364-371.

Fråga nr 5, fortsatt arbete

- Spricktillväxt studeras vidare
 - provning och modellering av Cu-OFP för 22, 75, 175 och 215 °C
 - 2 typer av krypskador är inkluderade: "ductility exhaustion" (dominerar vid lägre temperaturer) och tillväxt av kaviteter i korngränser (dominerar vid högre temperaturer)
 - publicerat i Wu, et al, Creep crack growth in phosphorus alloyed oxygen free copper, Materials Science & Engineering A, 583 (2013) 151-160
- Försök pågår att mäta korngränsglidning, men experimentellt svårt
- Beräkningar på Cu-OFP för att få ökad förståelse för fördelningen av olika element i materialet
 - faser – termodynamik (Magnusson och Frisk 2013, SKB TR-13-11, trycks i september)
 - fasomvandlingar - diffusion (pågår)
- Slutsatserna från de olika arbetena summeras i ett PM .

Fråga nr 6, ytterligare experimentellt underlag för att verifiera användande av 2 mm stabil spricktillväxt i segjärn som en brottmekanisk materialegenskap för skadetåligshetsanalysen

- Ytterligare brottseghetsprovning har genomförts, både av BWR och PWR.
- Det har visat sig att 2 mm stabil spricktillväxt uppnås med både SENB-provstavar och CT-provstavar.
- Det viktigaste framsteget är att brottseghetsprovningen utförs i rätt atmosfär, d v s gas.
- 2 mm stabil spricktillväxt uppnås dock även i vatten.

Fråga nr 7, verifiering av att brottsegheten för provstavar uttagna i radiell riktning motsvarar brottsegheten för provstavar uttagna i insatsens axiella riktning

- Ytterligare brottseghetsprovning har genomförts, både av BWR och PWR.
- Det har ej kunnat påvisas någon signifikant skillnad beroende på om proven tagits ut axiellt eller radiellt.
- Även då brottseghetsprovningen utförts i vatten vilket har en reducerande inverkan på J -värdet, så har ändå 2 mm stabil spricktillväxt erhållits.

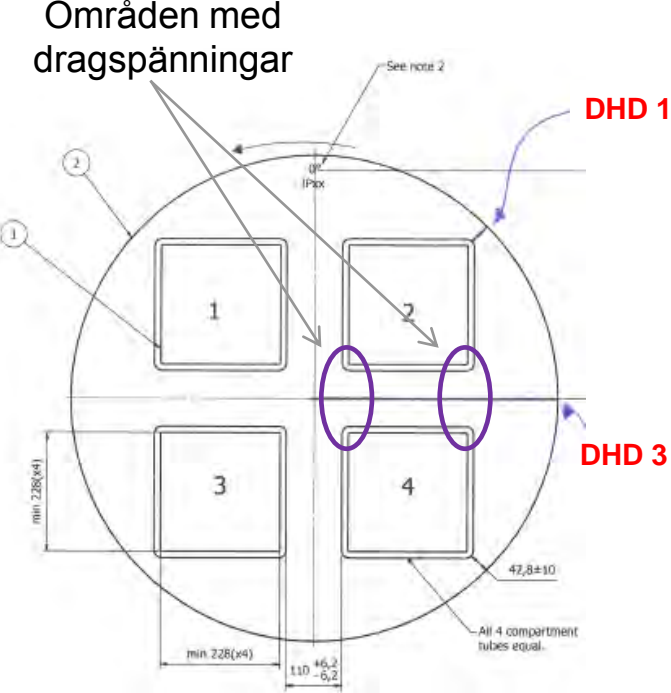
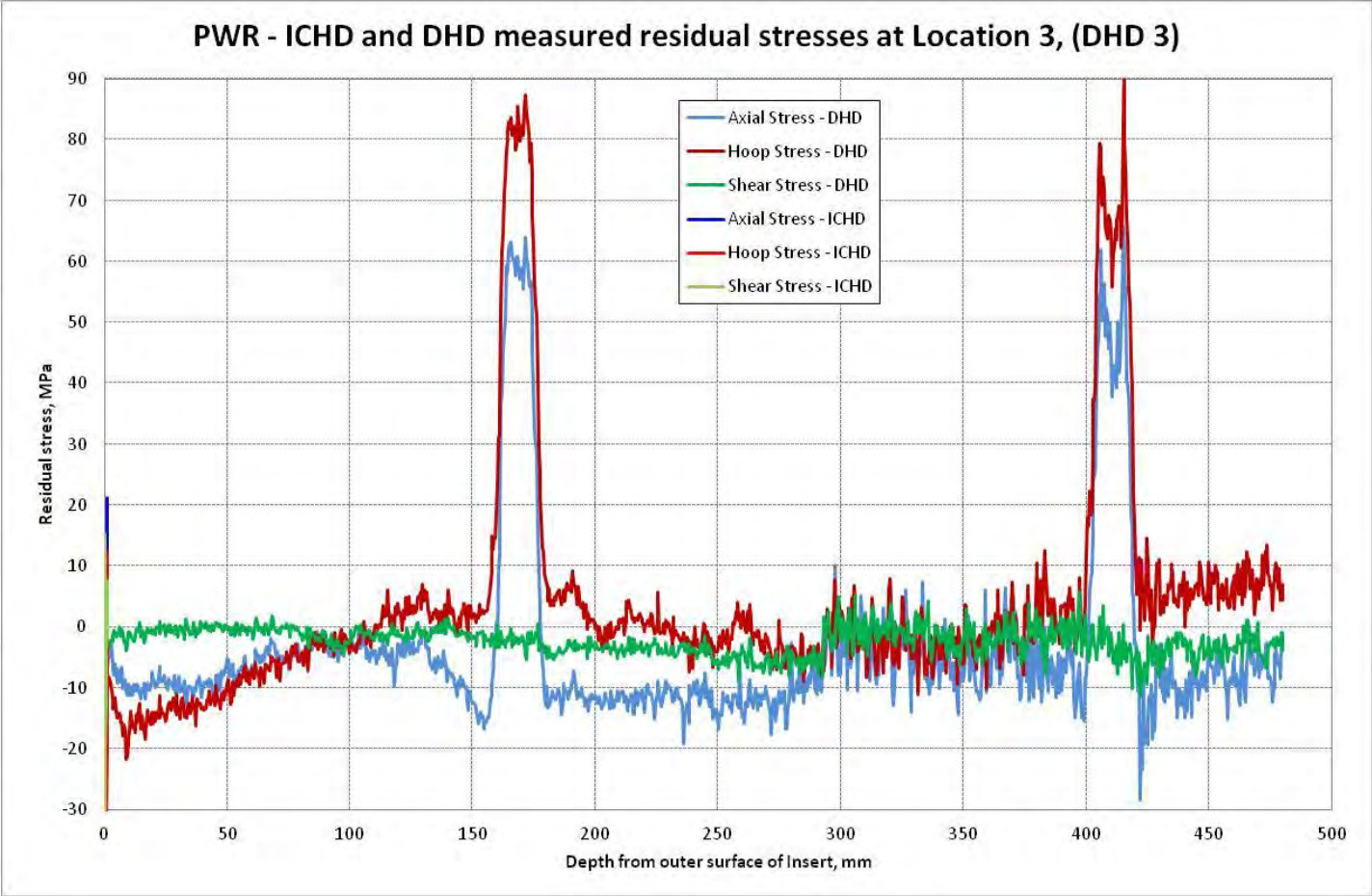
Fråga nr 8, redovisning av skadetålighetsanalys för PWR-insatsen inklusive en statistisk analys för variationen i materialdata (brottseghet, brottöjning)

- Skadetålighetsanalys genomförd, med ansatt brottseghet 78 kN/m vid 2 mm stabil spricktillväxt.
- Det ger minsta acceptabla djupet för en sprickliknande defekt = 4,1 mm för PWR.
- Det ska jämföras med 4,5 mm för motsvarande värde för BWR.
- Uppnådda brottseghet vid tre tillverkningsprov preliminärt PWR (> 140 kN/m).
- Dataanalys av de tre senast tillverkade PWR-insatserna återstår .

Fråga nr 9, redovisning av inverkan av restspänningar efter gjutningen på skadetålighetsanalysen för BWR respektive PWR insatserna

- Restspänningsmätningar genomförd med djuphålsborring (DHD) för BWR och PWR.
- Resultaten visar på att de inre spänningarna är låga generellt sett, även på större djup.
- Undantaget är för PWR mellan kanalrören där det förekommer ca 80 MPa dragspänning.
- Värdering av restspänningarnas inverkan på skadetåligheten för isostatlastfallet är under utarbetande och planeras äga rum under hösten.

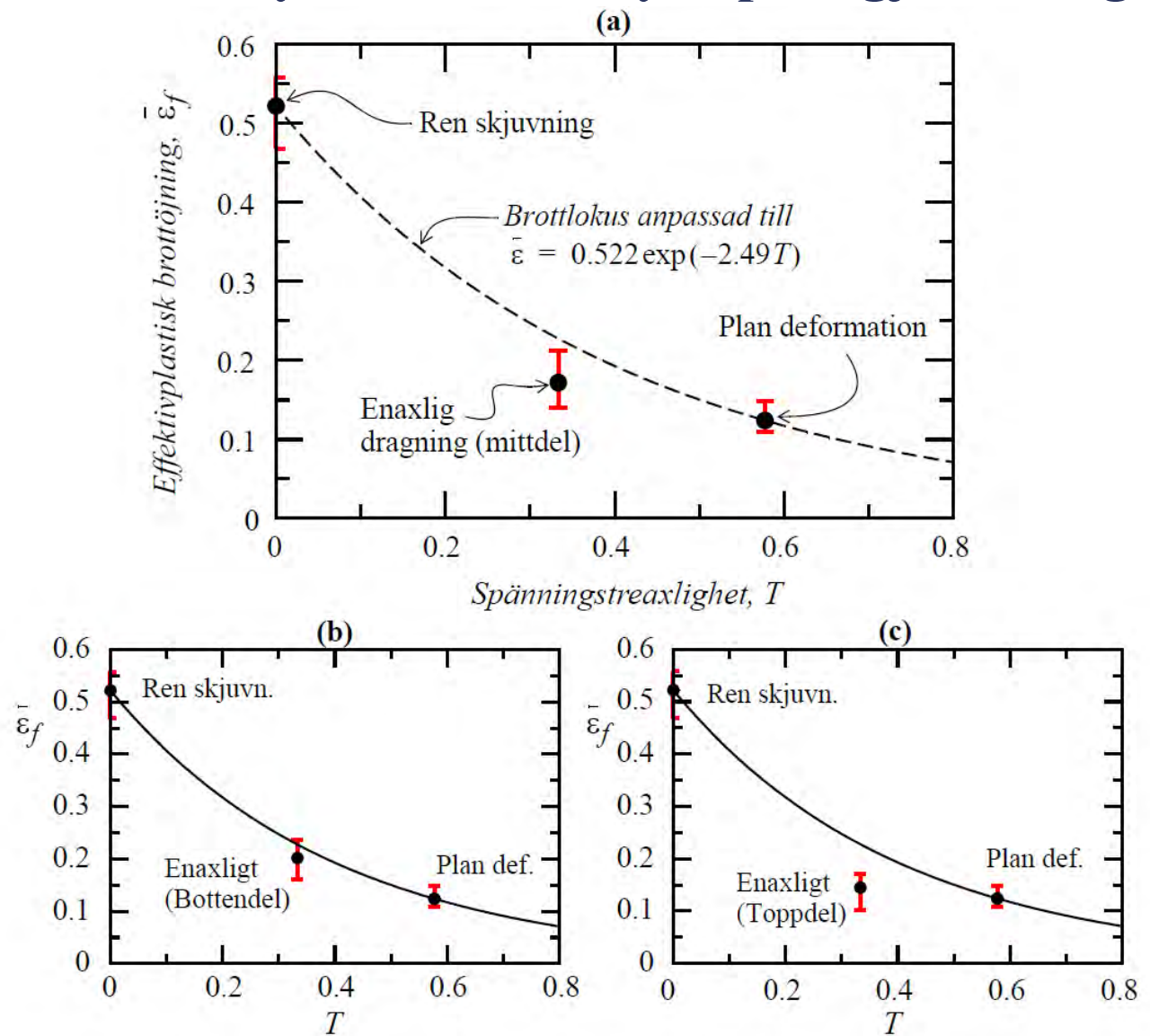
Fråga nr 9, redovisning av inverkan av restspänningar efter gjutningen på skadetålighetsanalysen, DHD-mätning av PWR, (DHD 3)



Fråga nr 10, inverkan av hydrostatiska tryck på segjärnets plastiska egenskaper och hur detta påverkar skadetåligheten

- Inverkan av treaxlighet har undersökts på KTH under 2011-2012 med ledning av en FUD-kommentar.
- Mekanisk provning på segjärnet i plan deformation och ren skjuvning har utförts, dessa visar på att enbart treaxligheten i spänningstillståndet verkar ha ett starkt inflytande på brottöjningen i segjärnet.
- Kompletterande provning och litteraturstudier genomförs på KTH. Målsättningen är att skapa tillräckligt underlag för att bestämma inverkan av treaxlighet på segjärnets plastiska egenskaper och skadetåligheten. Klart 2013.
- Själva värderingen av inverkan på skadetåligheten görs dock efter att KTH-studien genomförts.
- Summering och färdigställning beräknas vara klart i januari 2014.

Fråga nr 10, inverkan av hydrostatiska tryck på segjärnets egenskaper



Effektivplastisk brottöjning som funktion av treaxlighet



Fråga nr 11, redovisning av sambandet mellan skjuvrörelsens storlek och antalet kapslar som går till brott i samband med jordskalv

- Kapselbrott innebär att kopparhöljet brister och att kapseln förlorar sin isolerande funktion. Detta sker om den tillåtna töjningen i kopparhöljet överskrids.
- En sådan händelse skulle kunna inträffa vid skjuvning nära locket (vilket tidigare visats inte vara fallet.)
- Samma händelse skulle kunna inträffa om insatsen går av och skadar kopparhöljet direkt eller långsiktigt.

Fråga nr 11, redovisning av sambandet mellan skjuvrörelsens storlek och antalet kapslar som går till brott i samband med jordskalv

Insatsens hållfasthet

- Risken för plastisk kollaps har tidigare i framställningen visats vara mycket liten.
- Risken för spricktillväxt har studerats i den probabilistiska analysen. Sannolikheten för brott är liten men kan inte uteslutas.

Kopparhöljets hållfasthet

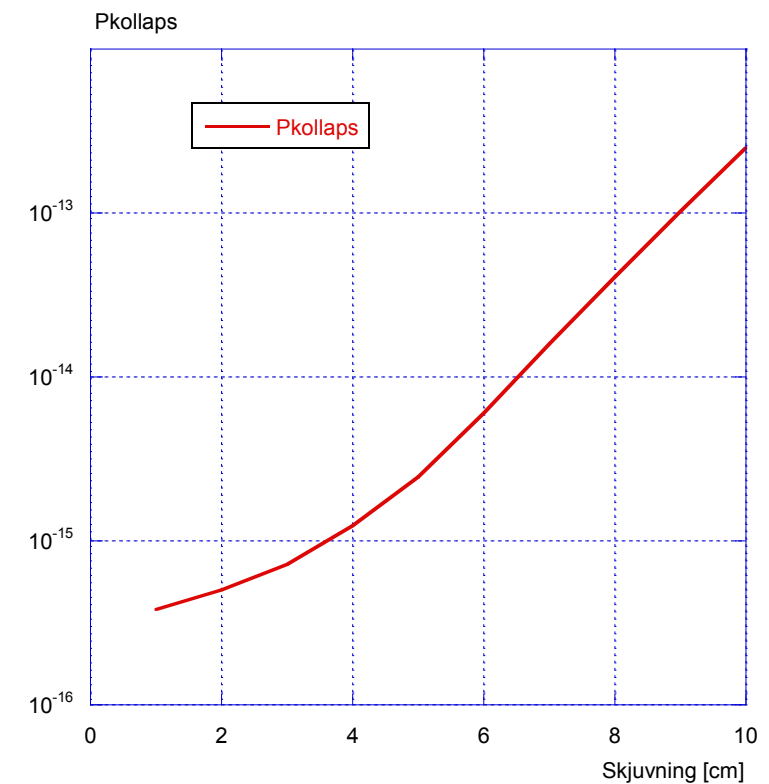
SKB har även studerat vad som händer med kopparhöljet om insatsen går av.

Resultat Cu för höljet då insatsen går av vid (3/4 skjuvning, 2050 kg/m³)

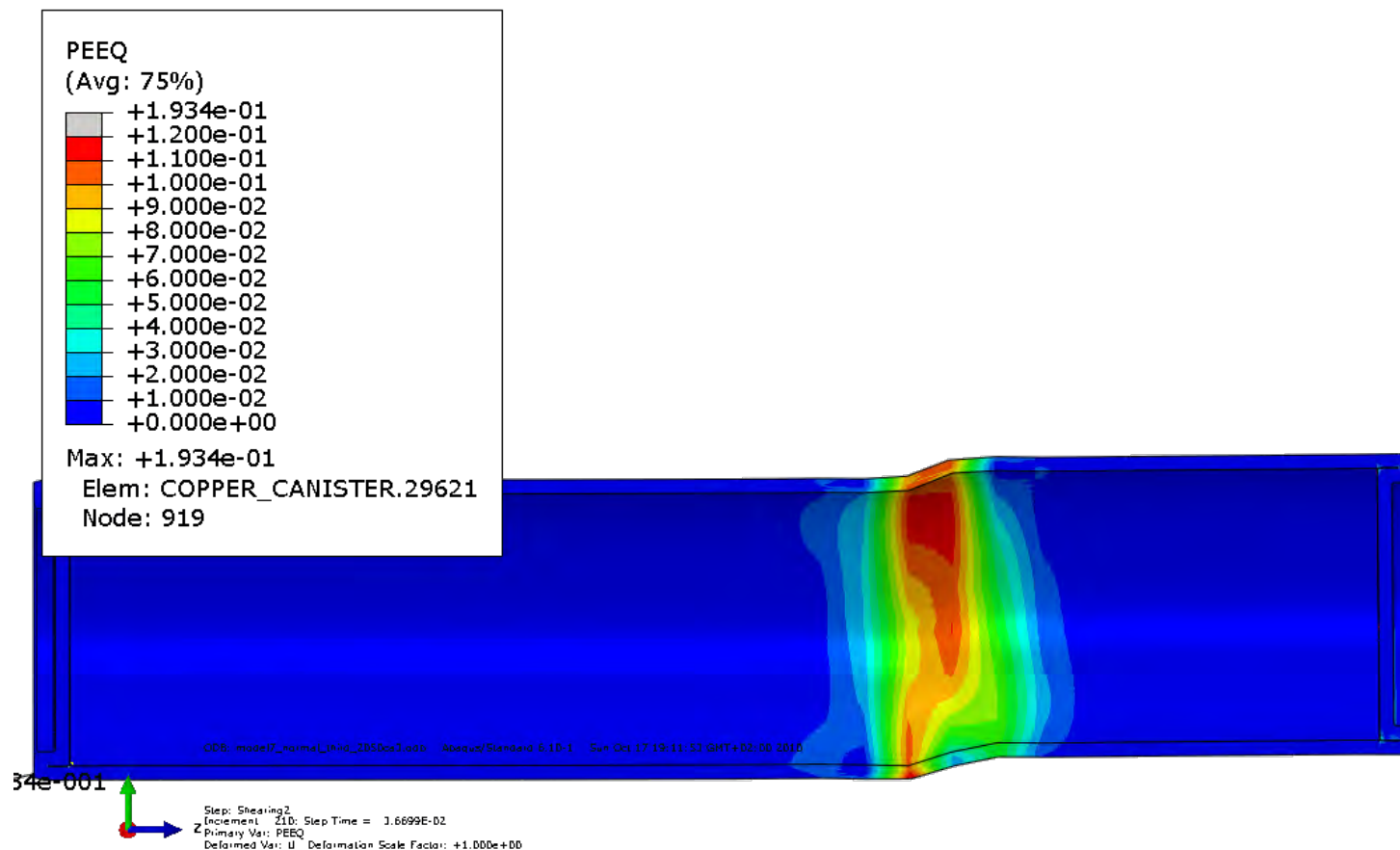
Lokal sann töjning Cu : < 17%

Efterföljande krypning, lokal kryptöjning Cu 6,8 %, vid 15 MPa yttre last.

Båda dessa töjningar ligger långt från kritiska värden.



Fråga nr 11, redovisning av sambandet mellan skjuvrörelsens storlek och antalet kapslar som går till brott i samband med jordskalv, simulering av insatsbrott och 5 cm skjuvning, 2050 kg/m³ bentonitdensitet, kopparhöljets hållfasthet



Fråga nr 12, inverkan av det kombinerade lastfallet böjspänning från ojämn svällning samt skjuvlast från jordbävning och hur det påverkar kapselns mekaniska integritet och acceptabla defektstorlekar

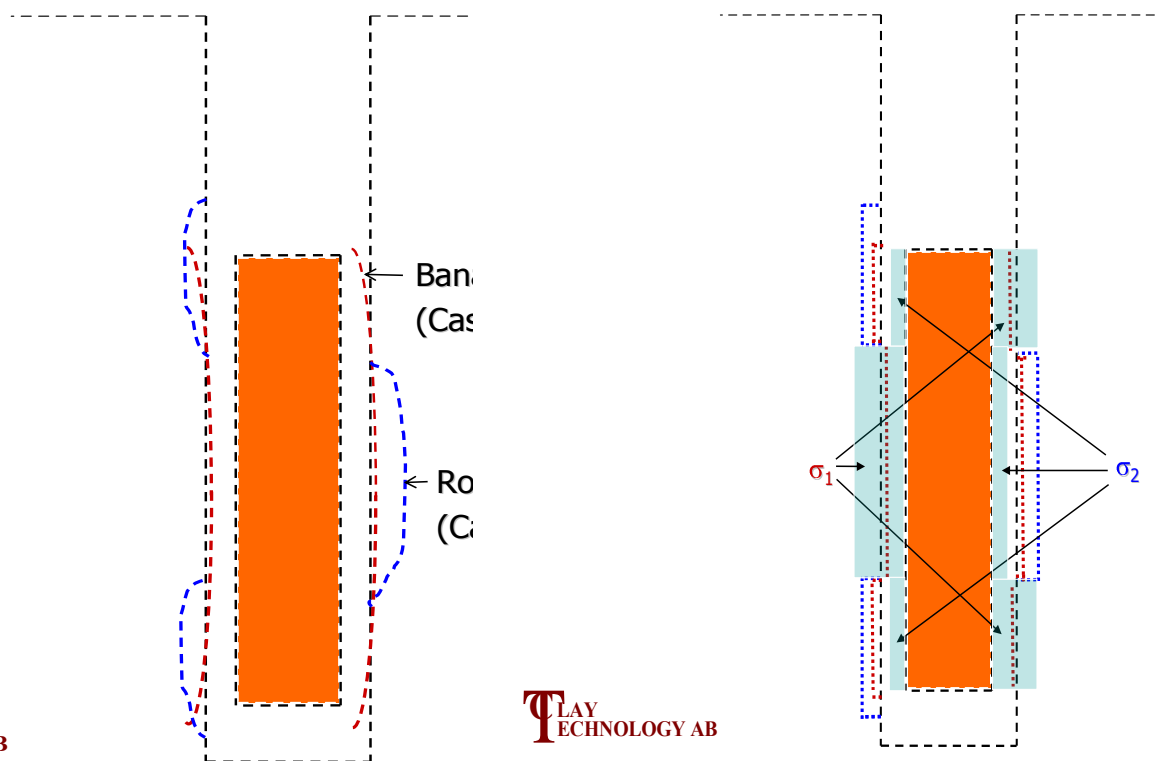
- *SKB bör analysera lastfall med kombinerad böjspänning orsakad av ojämn svällning av bentoniten och skjuvlast från jordbävning. Detta lastfall omnämns i /TR-10-28/ men finns inte analyserat i ansökansunderlaget. SSM anser att SKB behöver analysera detta kombinerade lastfall med avseende på kapselns strukturella integritet och betydelsen för acceptabla defektstorlekar i insatsen*

Fråga nr 12, förutsättningar

Samma förutsättningar som i SKBdoc1206894

$$\rho_1=2020 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \sigma_1=7,8 \text{ MPa} + 5 \text{ Mpa (H}_2\text{O)}$$

$$\rho_2=1970 \text{ kg/m}^3 \quad \sigma_2=3,7 \text{ Mpa} + 5 \text{ Mpa (H}_2\text{O)}$$



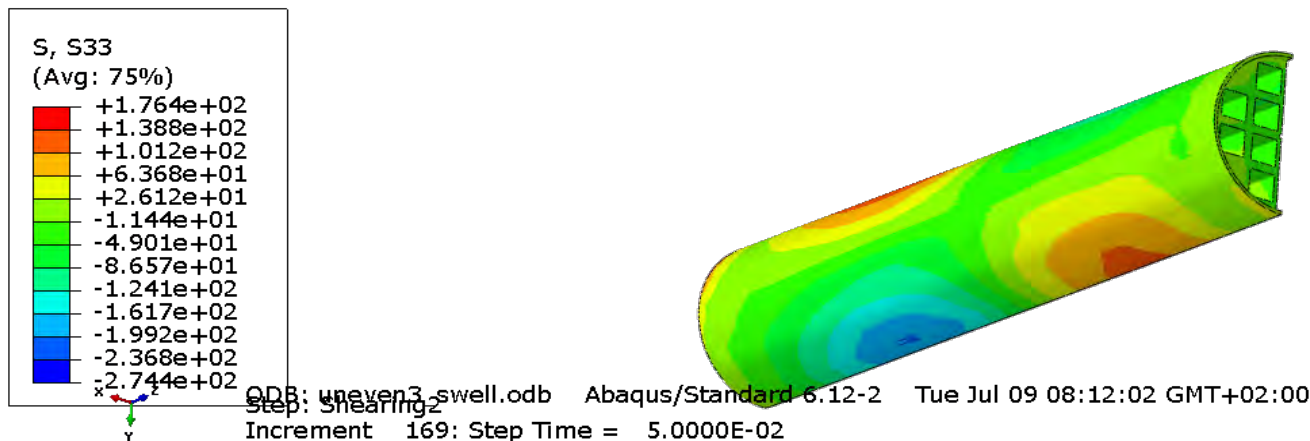
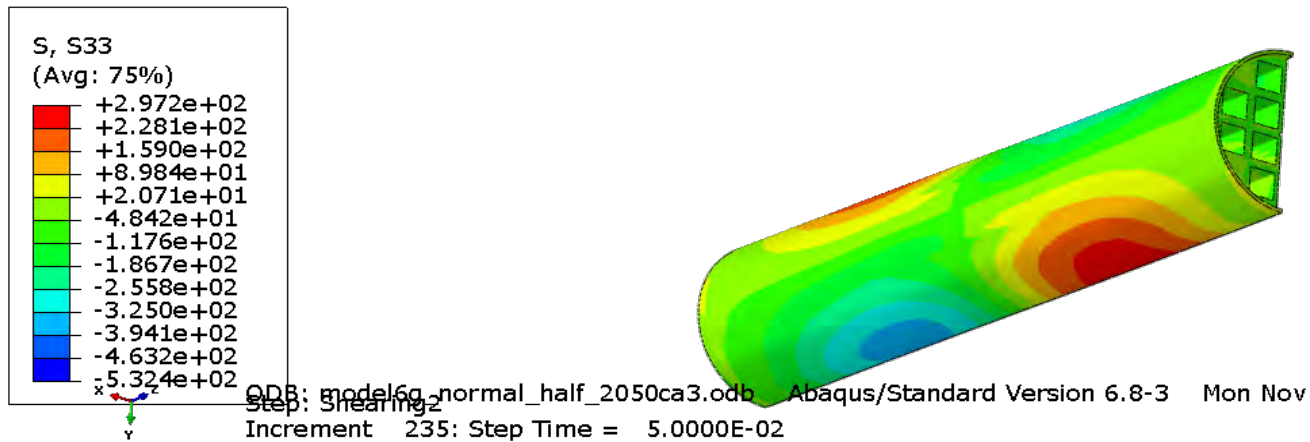
Fråga nr 12, strategi

- Code Abaqus
- Elasto-plastiska materialmodeller för kapseln
- Bentonit modell som tidigare

Utvärdera mot resultat för basfallet ($\rho = 2050 \text{ kg/m}^3$, 5 cm skjuvning)

Undersök effekt av mittskjuvning och $\frac{3}{4}$ skjuvning

Fråga nr 12, exempel på resultat, s33



Övre basfallet, nedre 10 cm skjuvning med kombinerad böjning skjuvning

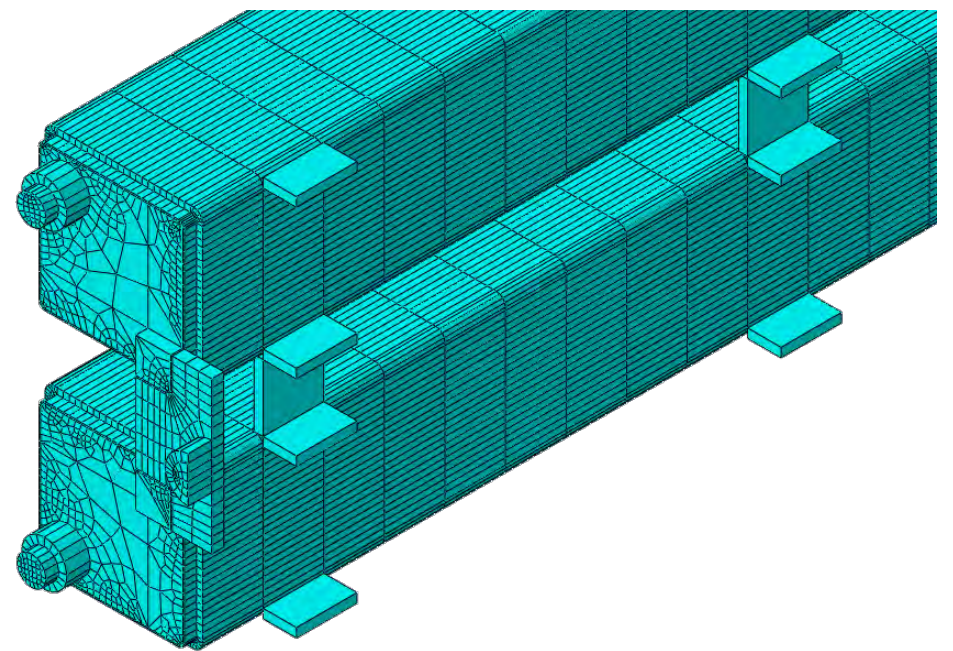
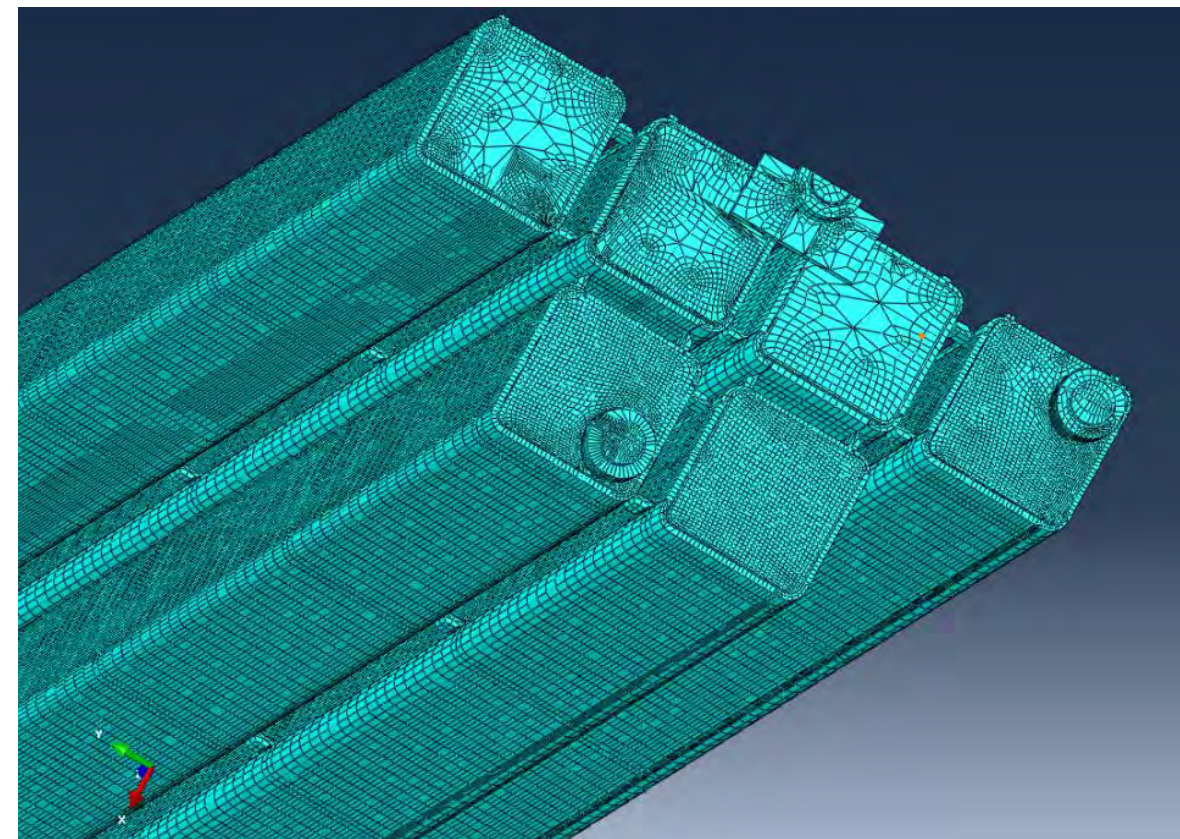
Fråga nr 12, slutsatser

- Beräkningarna visar att spänningarna i insatsen är lägre vid skjuvning med inhomogen buffert jämfört med basfallet.
- Därmed påverkas inte genomförda skadetålighetsberäkningar.

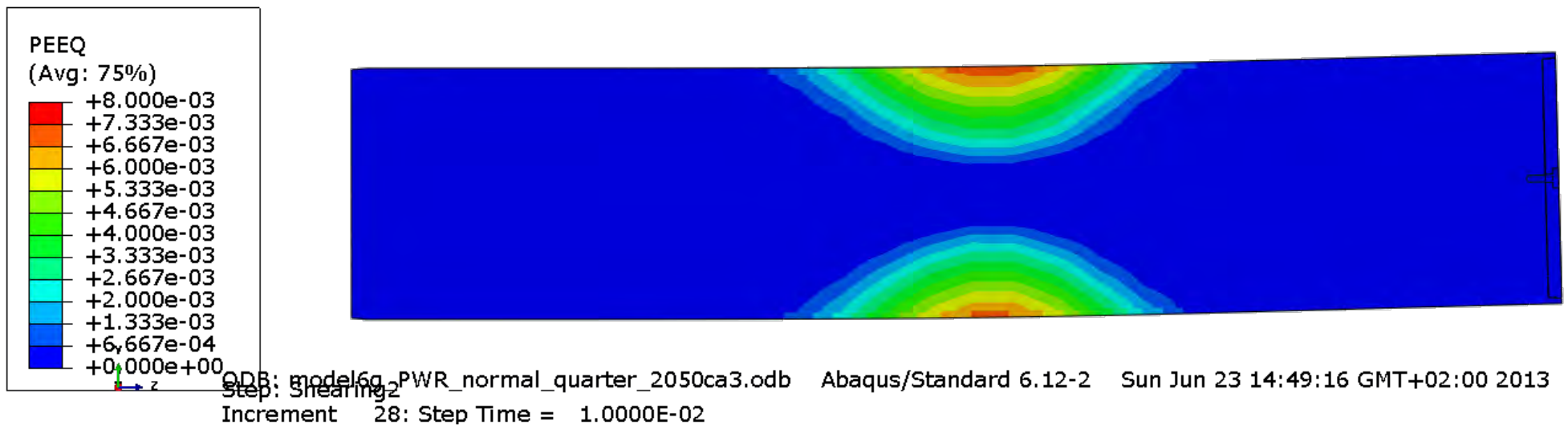
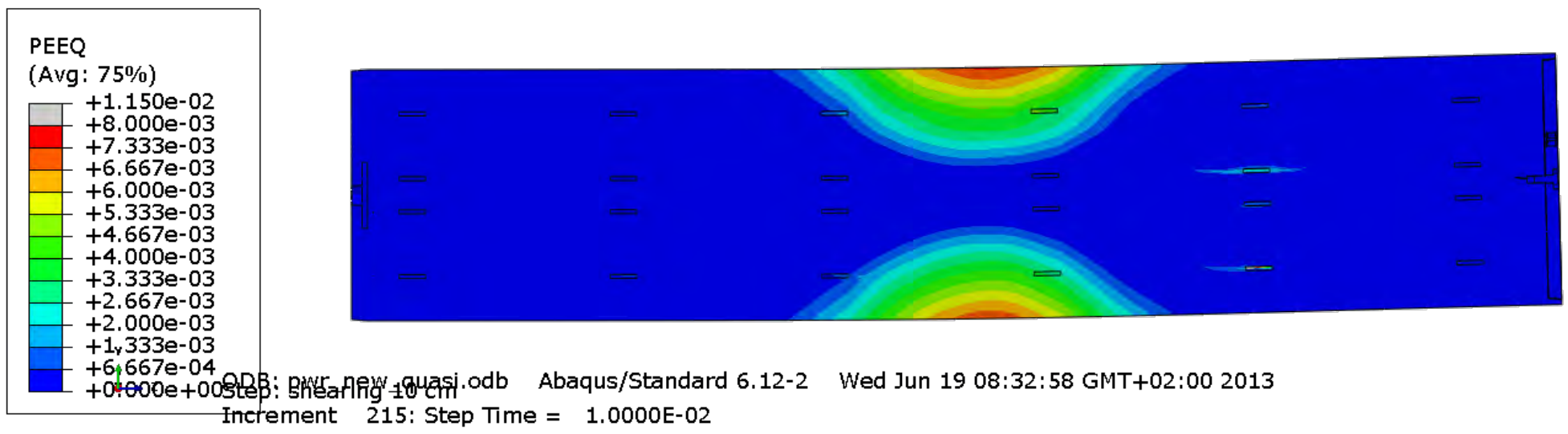
Fråga nr 13, inverkan av beräkningsteknisk förenkling mellan insats och kanalrör på skadetålighetsanalysen

- Det pågår arbete med att genomföra FE-analyser för hela kapslar med BWR- och PWR-insats där kanalrören ej är ”fastsvetsade” i segjärnet.
- FE-modellerna är väldigt detaljerade, komplett med stagplåtar mellan kanalrören. PWR-modellen består av ca 230 000 element.
- Kassetten modelleras därför med kontaktvillkor mot segjärnet.
- Det bedöms som att det inte är nödvändigt med en ny skadetålighetsanalys, om de globala töjningarna blir jämförbara med de som erhållits med fastsvetsade kanalrör.
- Beräkningsresultat finns ännu så länge endast för PWR, utan skadetålighetsanalys så beräknas färdigställning och rapportering kunna vara klart i december 2013.

Fråga nr 13, meshning av FE-modell för BWR respektive PWR med lösa kanaler och stagplåtar



Fråga nr 13, jämförelse mellan beräkningsmodellerna PWR, överst lösa kanlrör och stagplåtar, undre ”fastsvetsade” kanlrör



Fråga nr 14, analyser hur tillverkningsstoleransen för avståndet mellan kanalrören och insatsens ytteryta (H) påverkar kapselns mekaniska integritet

- Det är planerat att skapa en FE-modell för BWR respektive PWR med sämsta tillåtna centreringsavvikelse av kanalrören.
- Ett skjuvplan planeras, det så kallade 75%-fallet med bentonitdensitet 2050 kg/m³.
- Det är komplicerat och tidsödande att bygga dessa FE-modeller.
- Jämförelse med ideal centreringsavvikelse av kanalrören kommer att göras. Om det bedöms som nödvändigt, kommer en ny skadetålighetsanalys att göras, men endast om det bedöms som nödvändigt.
- Ännu inga beräkningsresultat, utan skadetålighetsanalys så beräknas färdigställning och rapportering kunna vara klart i december 2013.

Fråga nr 15, inverkan av olikformig fördelning av gapet mellan insats och kapsel

Det maximala axiella gap som kan förväntas mellan insatsen och kapsel är cirka 4.8 mm enligt SKBdoc1333256. En spänningsberäkning för detta fall finns redovisat i /TR-09-32 kap. 11.2/.

Denna beräkning bygger på antagandet att bentoniten sväller likformigt vid kapseln botten och topp. SSM anser att SKB bör presentera orsaken till att hela denna axiella förskjutning enbart kan vara lokaliserat mot kapselns lock, dvs. att bufferten återmättas olika fort i toppen och botten. SKB bör även analysera fallet då hela gapet är lokaliserat till kapselns topp.

Fråga nr 15, förutsättningar

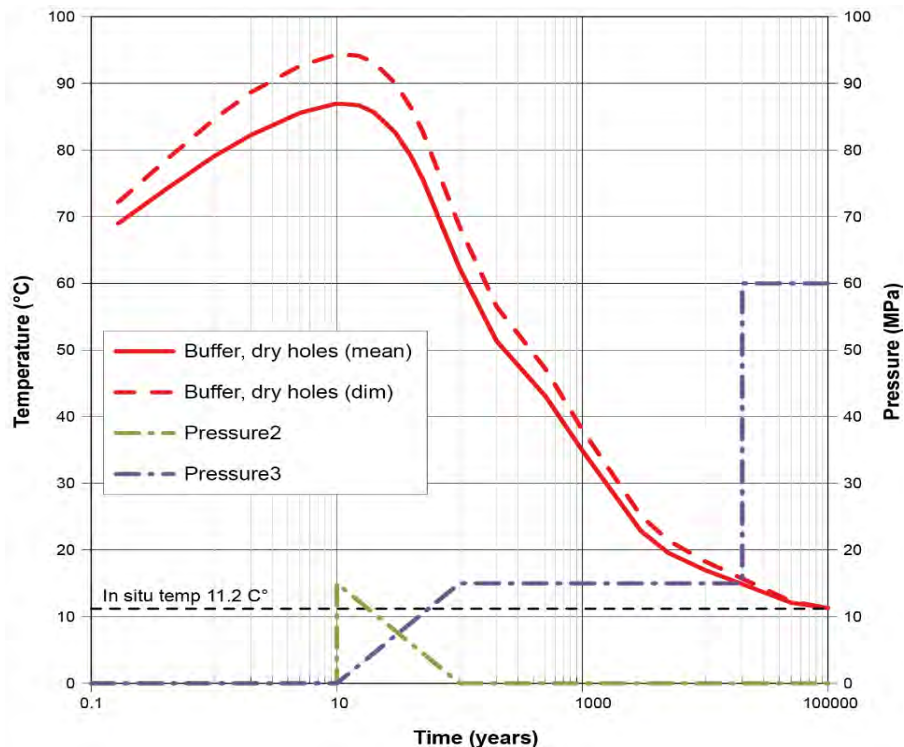
Största spalt mellan insats och kopparlock givet ritningstoleranser (3,1 mm) ansätts.

Svälltryck läggs på vid högsta temperatur (inre gastryck medräknas).

Fyra fall av temperatur/lastutveckling undersöks.

Analysen drivs till 60 MPa.

Rotfel i svetsen 3 mm ansätts.

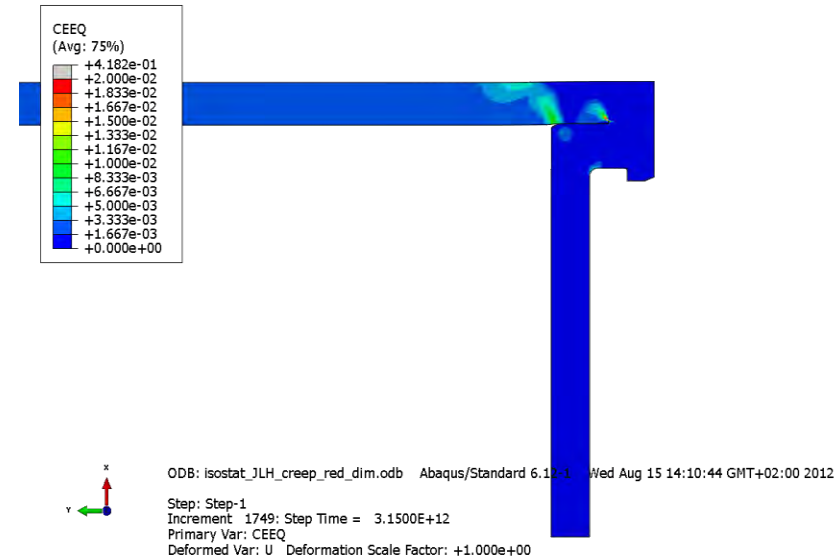
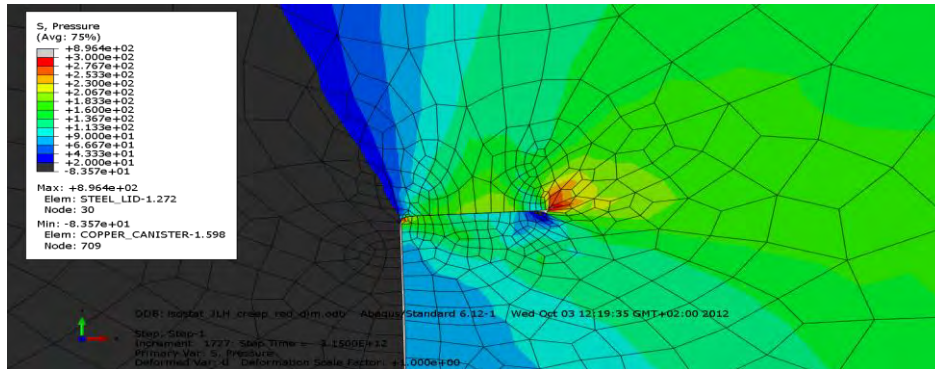


--- Temp utv. dim bergmassa och helt torr buffert.

Fråga nr 15, strategi

- Axialsymmetrisk modell används verifierad mot den "kända" globalmodellen
- Analyserna utförda med '*visco'-procedure i Abaqus som hanterar krypeffekter.

Fråga nr 15, resultat



Hydrostatiskt tryck i lockdelens svetsrot.
60 MPa yttre övertryck.

Kryptöjningar i lockdelen.
60 MPa yttre övertryck.

Spänningarna är i huvudsak kompressiva. Lokala kryptöjningar som är tämligen höga (kompressiva) uppstår.

Töjningarna är mera utbredda i botten svetsen där även mindre områden med lägre dragspänningar finns.

Bidraget från termiska spänningar är försumbart.

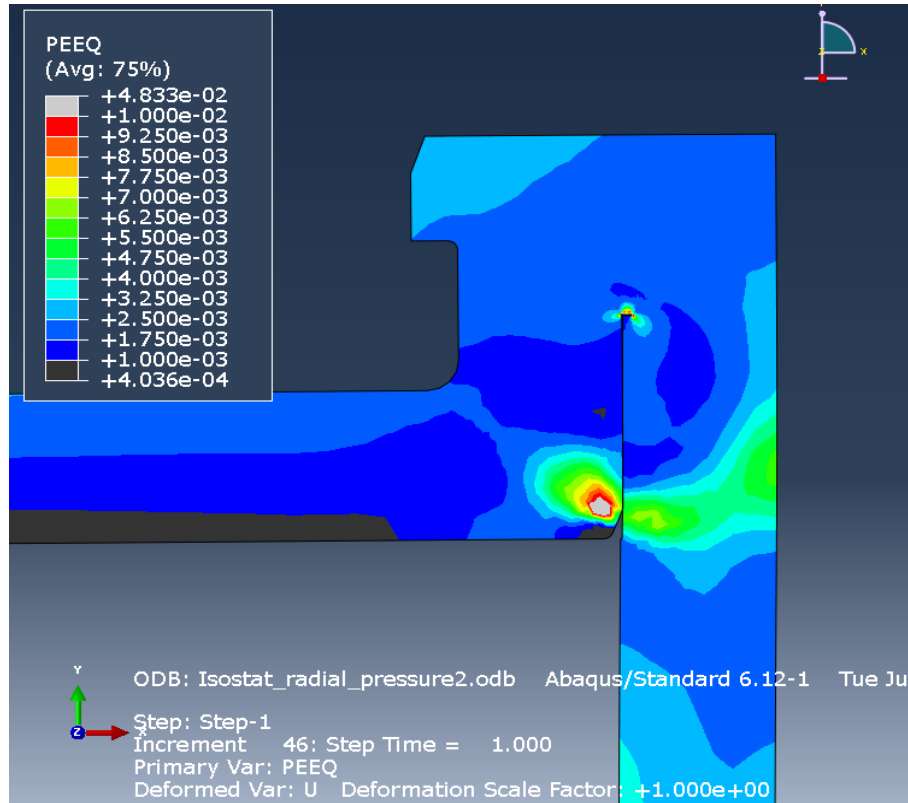
Vid högt isostattryck 60 MPa uppgår typiska kryptöjningarna i lockdelens svetsrot < 1,5% och i rotdelen av botten svetsen till 40% (kompressiva)

Fråga nr 16, inverkan av långa och ojämna återmättnadstider för bufferten på kapselns spänningstillstånd.

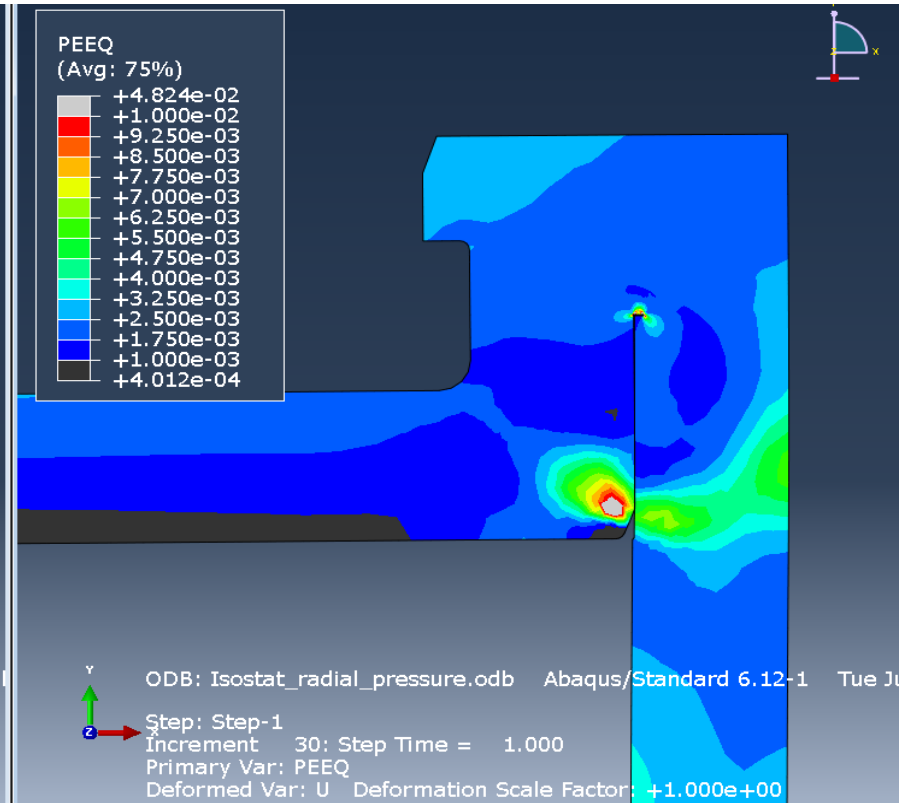
- I spänningsanalysen av kapsel antas att kapselns övre del fylls buffertmaterial och att ett svälltryck skapas lika fort i detta område som i buffertmaterialet vid kapseln sidor. SKB bör motivera vad som ligger bakom detta antagande. Dessutom anser SSM att en kompletterande analys bör utföras med ett svälltryck från buffertmaterialet vid kapselns sidor men utan att ett svälltryck utbildas som mottryck vid kapselns övre fläns.*

Fråga nr16, preliminära resultat

Första beräkningar med radiellt tryck 12,3 MPa (max tryck innan bevätning 2050 kg/m³).



Radiellt tryck enbart på flänsens utsida



Radiellt tryck även på cylinderns utsida

Fråga nr17, ytterligare redovisning av inverkan av skjuvspänningar som verkar på kapseln vid gradienter av buffertens densitet

Nya beräkningar har genomförts



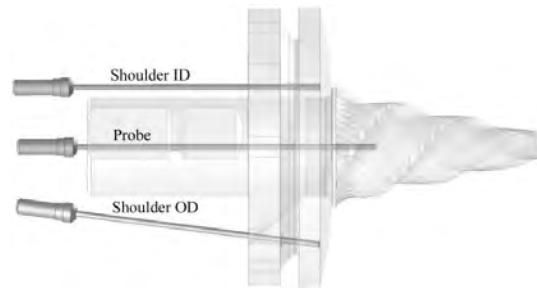
Status FSW

Innehåll

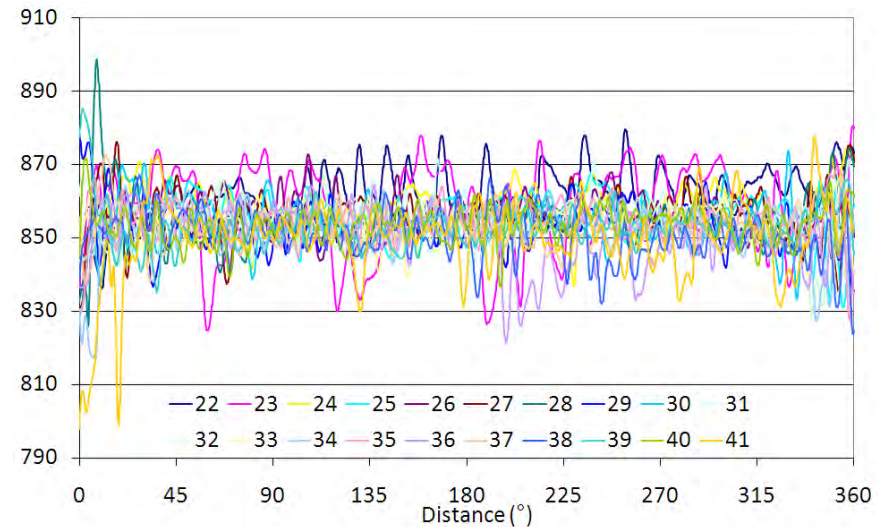
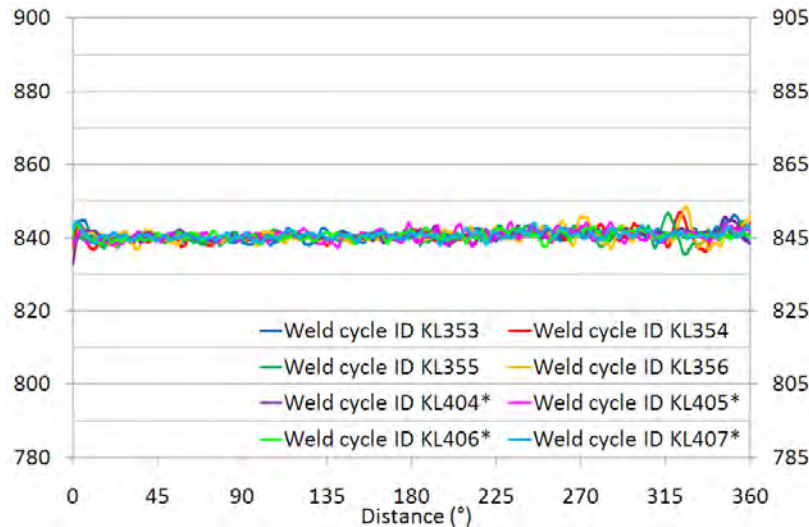
- Svetsprocedur
- Kompletteringsfrågor
 - Tillverkningsaspekter Nr. 5
 - Foglinjeböjning
 - Tillverkningsaspekter Nr. 4
 - Mekaniska egenskaper
 - Oxidbildning

Friction stir welding, status svetsprocedur

- Svetsning i Argongas för mindre oxidbildning
- Ersatt manuell reglering av svetsoperatör med regulator
 - Kaskadreglering av värmetillförsel och tapptemperatur

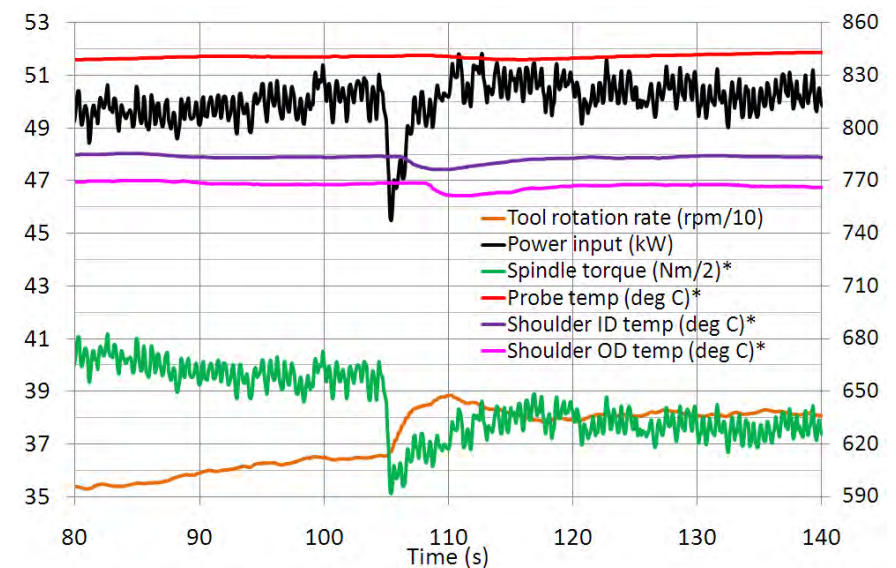
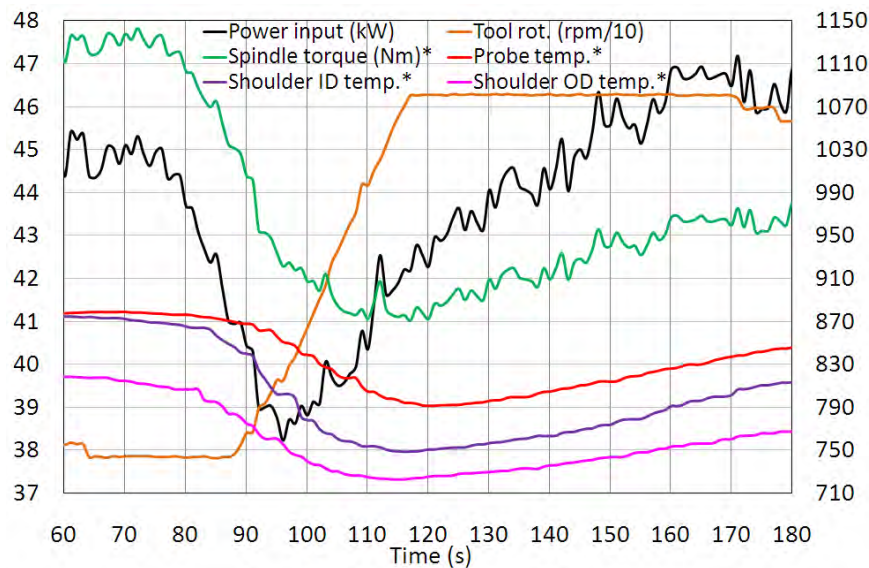
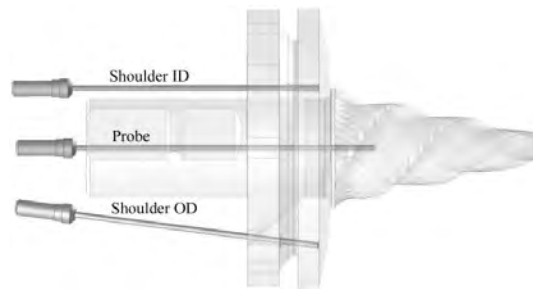


Name of series	Cycles	$T_{avg}-T_r$	σ_{avg}	$T_{min}-T_r$	$T_{max}-T_r$
TWI lid weld	2	+32	38	-68	+85
Manual axial force	2	+9	11	-25	+47
Demonstration series	20	+4	6	-52	+49
Initial controller	1	+3	4	-23	+19
Final controller	8	+0.6	1	-7	+8
Improved final controller	2	+0.4	1	-3	+5



Friction stir welding, status svetsprocedur forts.

- Regulatorn testas vid störningar (både verkliga och forcerade)
- Jämför manuell reglering och regulator vid verklig störning i nedgångssekvens

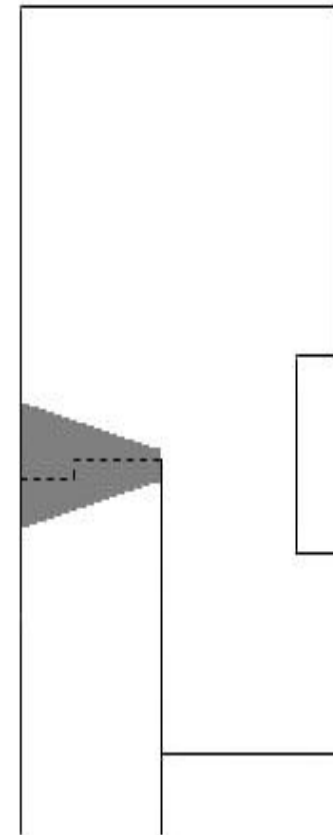


Tillverkningsaspekter, fråga 5

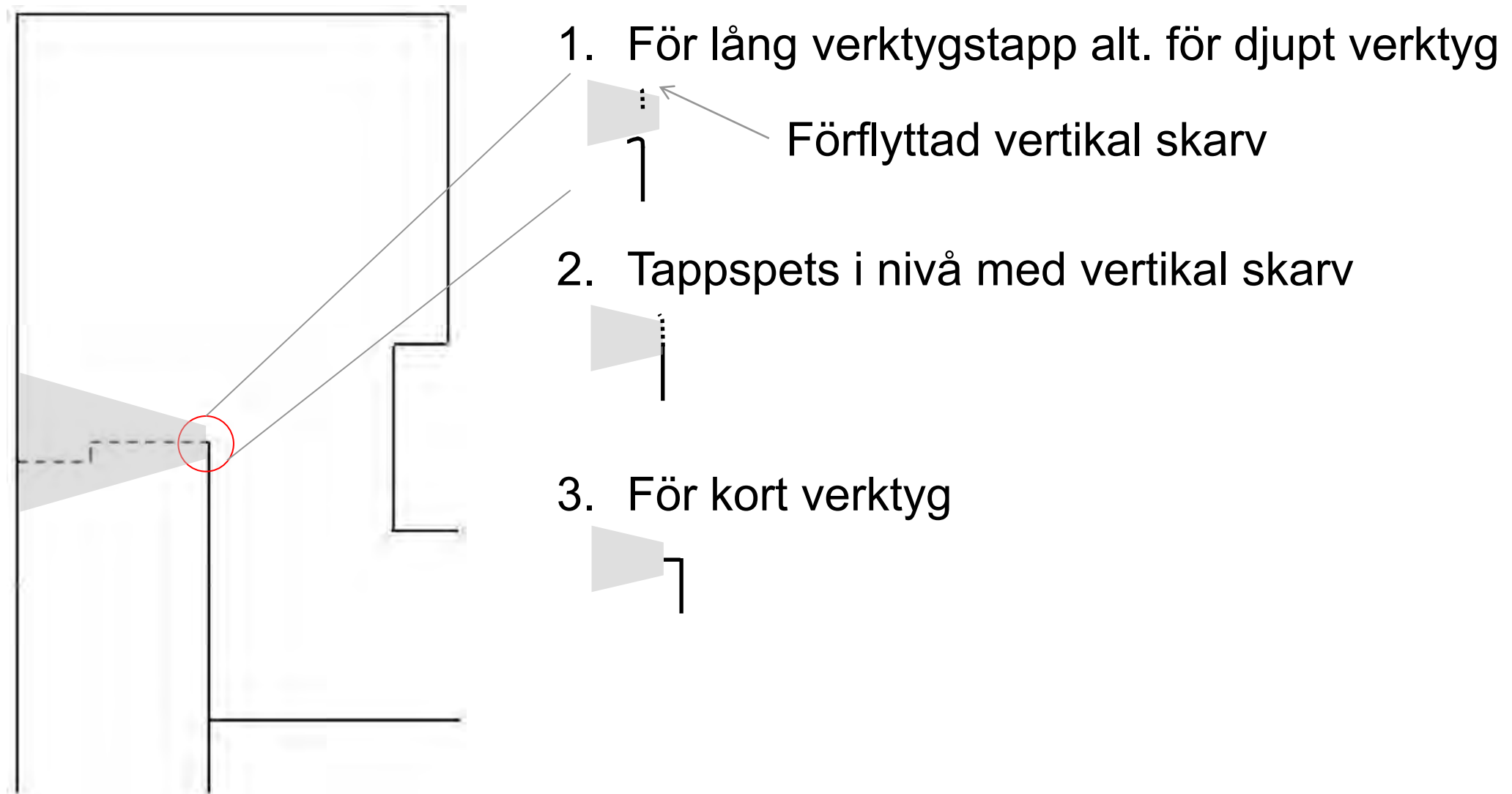
Samband mellan foglinjeböjningens radiella utbredning och bildandet av oxidinneslutningar vid FSW svetsning som funktion av processparametrar som skulderdjup.

Strategi:

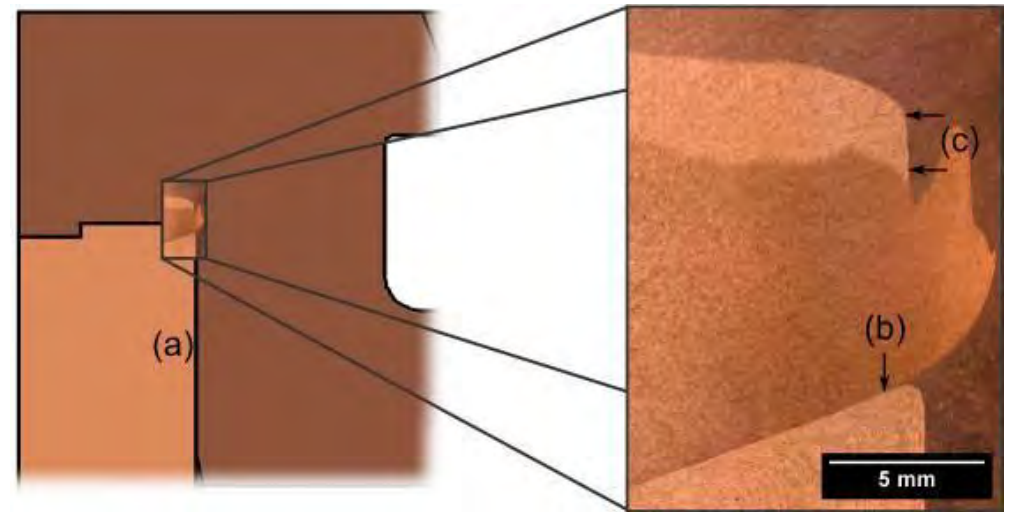
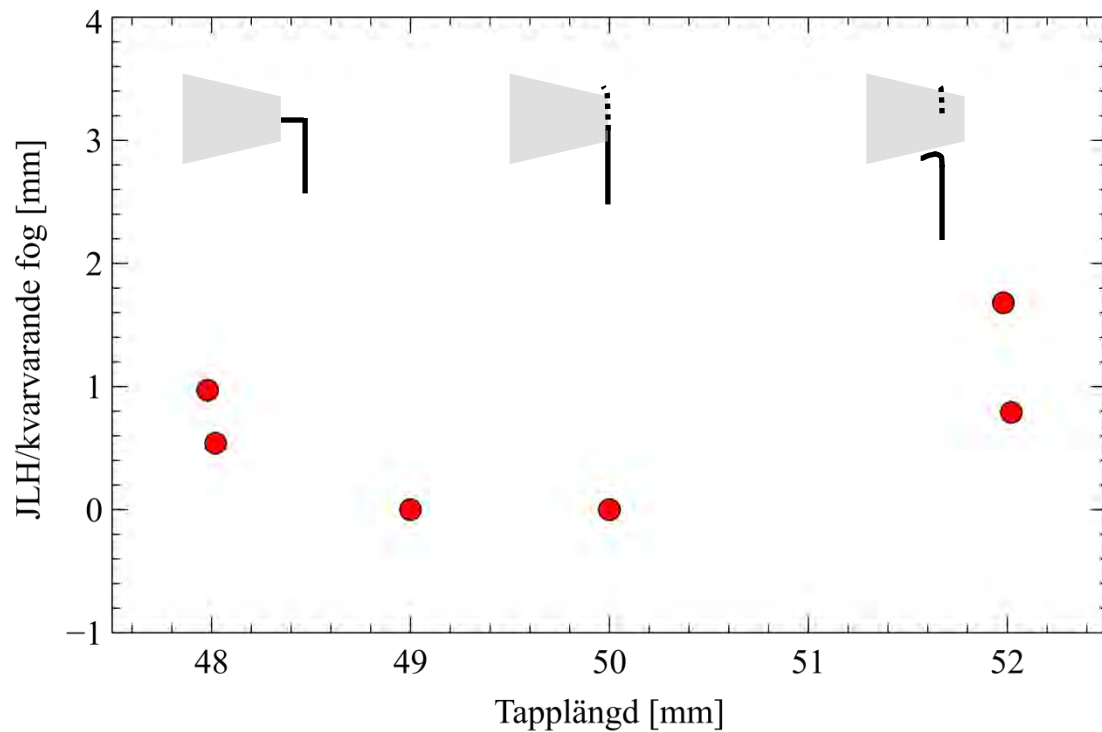
- Identifiera relevanta parametrar:
 - Vertikalt offset verktyg
 - Tapplängd
- Utföra känslighetsstudier
 - Fullvarvssvetsar (varierande djup)



Foglinjeböjning (JLH)

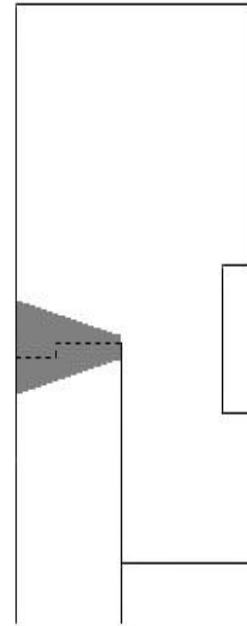
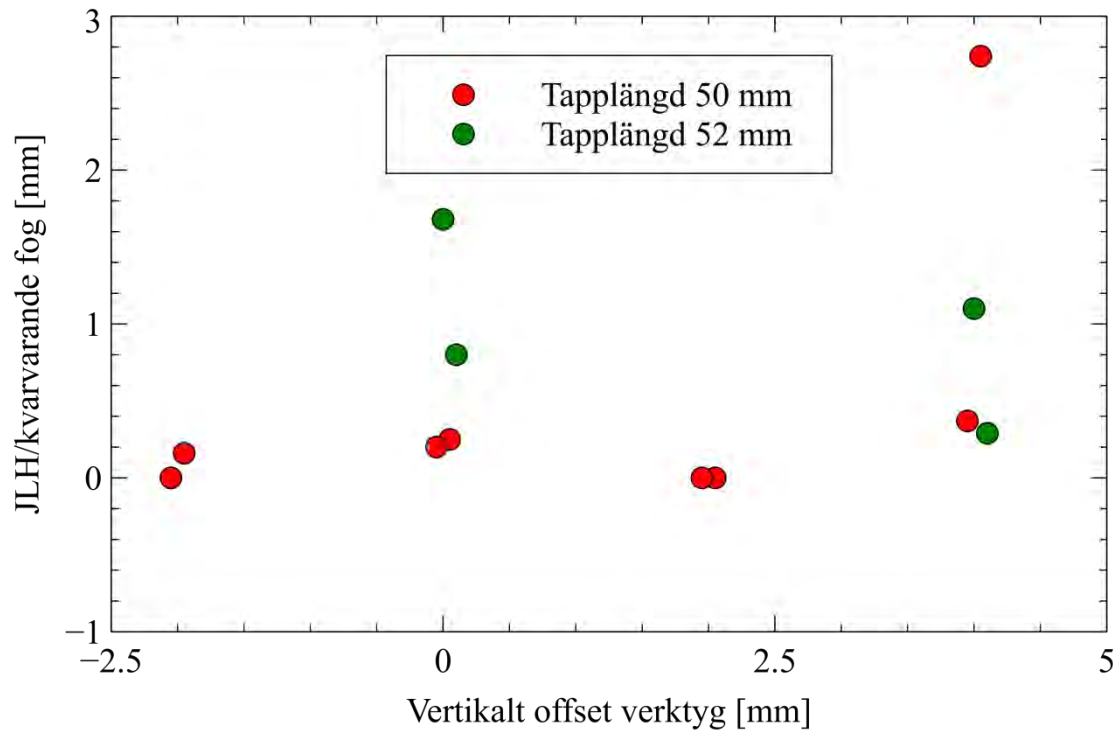


Foglinjeböjning, olika tapplängder.

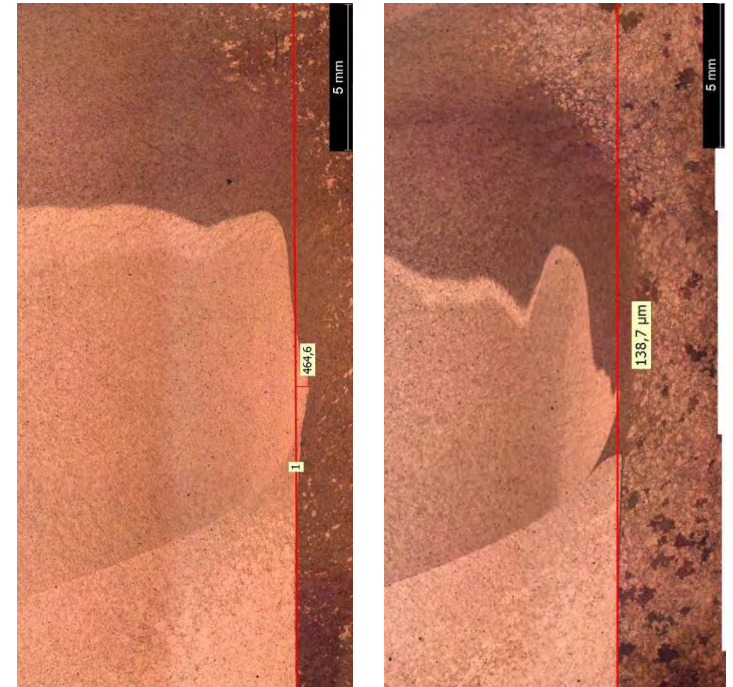


Tapplängd 52 mm, centrerat verktyg.

Foglinjeböjning, vertikal offset av verktyg.



Tapplängd 50 mm,
+2 och +4 mm vertikal offset.



Tillverkningsaspekter, fråga 4

Inverkan av oxidinneslutningar som bildas vid FSW svetsningen på kopparhöljets mekaniska integritet inklusive krypegenskaper bör beskrivas ytterligare.

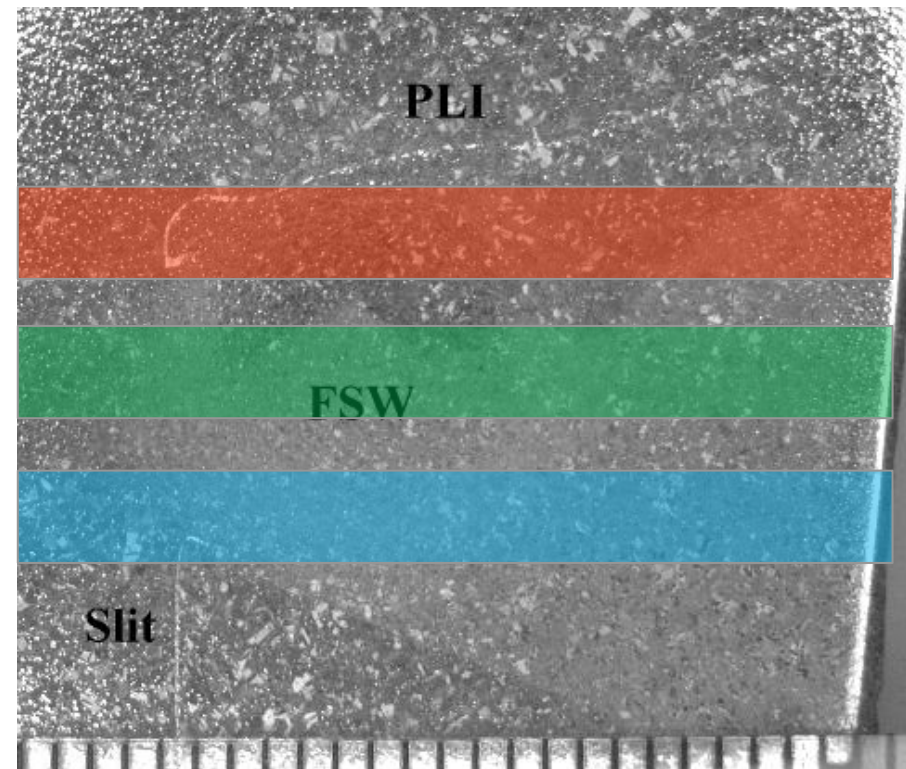
Strategi:

- Olika typer av imperfektioner innehållande oxider
 - Två rapporter från Swerea|Kimab ang. krypegenskaper
- Nuvarande arbete - oxidationskinetik

Mekaniska egenskaper, rotområde

Radiella prover

- Prover uttagna med **förflyttad vertikal skarv**
 - Lägre duktilitet och tid till brott än defektfritt material
- Prov med **JLH**
 - Lägre duktilitet och tid till brott än defektfritt material



Mekaniska egenskaper, andra riktningar

- Följande riktningar studerade tidigare, se TR 09-32
 - Axiella prover och tangentiella prover
- Krypduktilitet tillräcklig (>30%) och liten svetsreduktionsfaktor.
- Alla dessa prover svetsade i luft med ej rengjorda fogytter, d v s relativt stor mängd av oxidpartiklar.

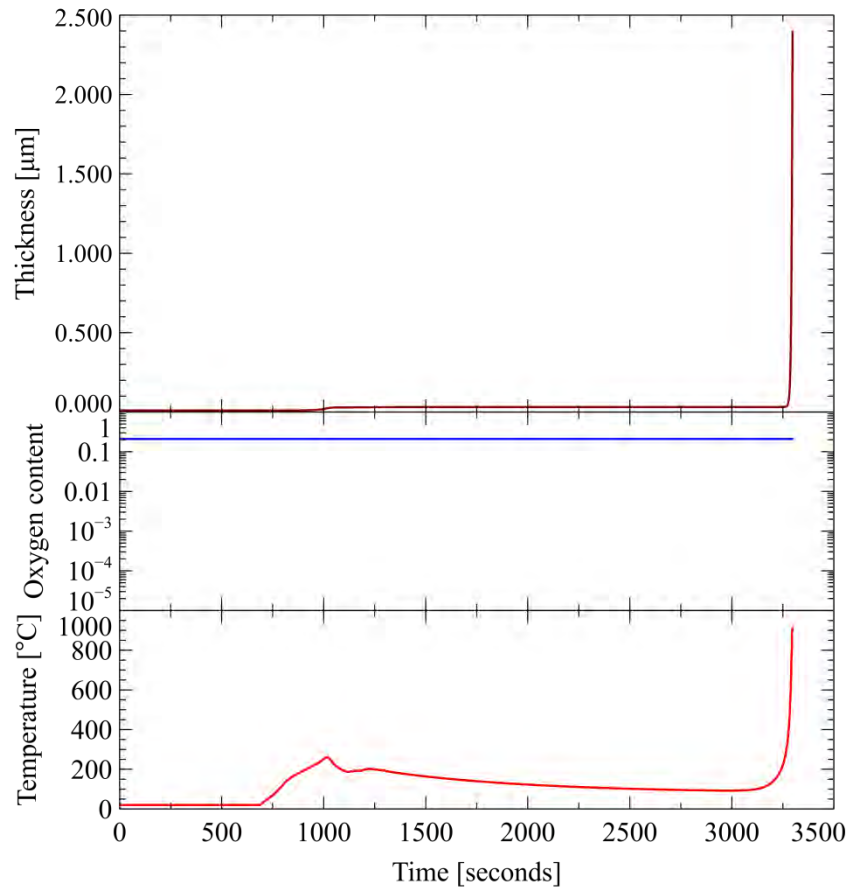
Oxidbildning, nuvarande arbete

- Mål: Utreda möjligheter i processen
 - Rengöring/initial oxid
 - Syrehalt under svetsning
- Arbetsplan
 - Framtagande av modell för oxidationskinetik
 - Uppmätning temperatur vid fogytor
 - Karakterisering av nuvarande gasskydd
 - Undersökning av förbättring av gasskydd

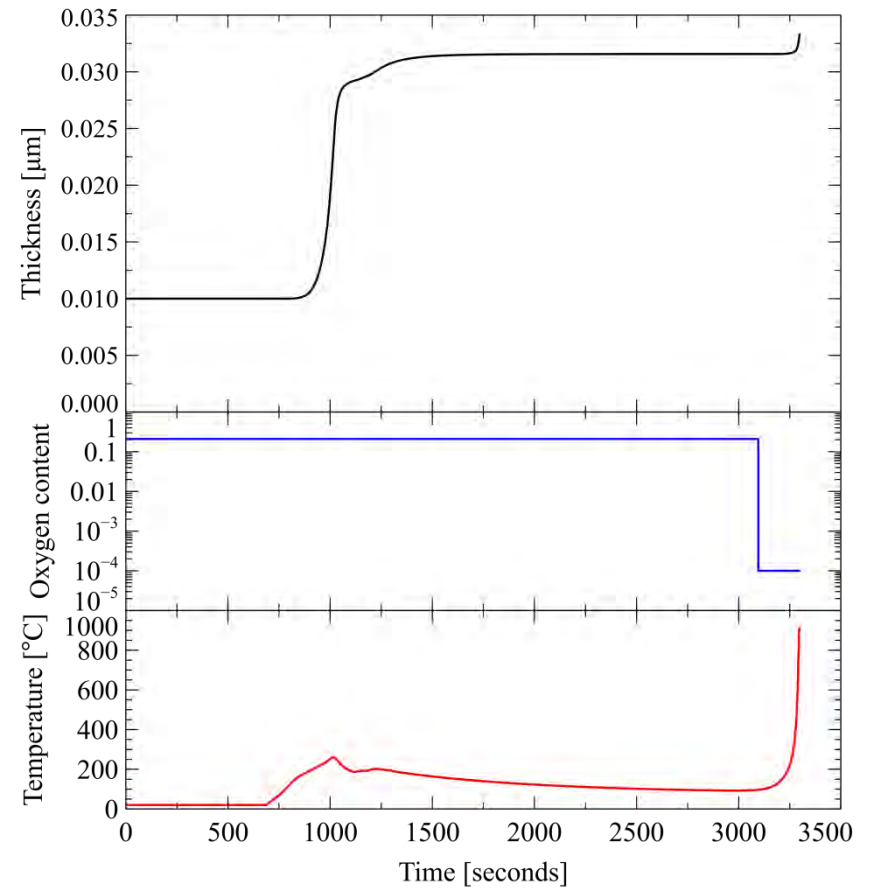
Oxidationskinetik, preliminära resultat



Inget gasskydd



Gasskydd vid verktyg



Avslutande kommentarer, fråga 4

- Oxidpartiklar p g a förflyttning vertikal skarv kan kontrolleras med process kontroll.
- SKB har inte noterat att partiklar i processlinjen är kritiska för krypduktiliteten.
- Pågående arbete undersöker renheten innan sammanfogning.
- Oxidationskinetiksberäkningar kan troligtvis användas för att definiera processfönster.