



DokumentID
1458607

Ärende

Strålsäkerhetsmyndigheten
Att: Ansi Gerhardsson
171 16 Stockholm

Handläggare
Håkan Rydén
Er referens
SSM2011-1137-64
Kvalitetssäkrad av
Jan Eckerlid
Jan Sarnet
Godkänd av
Helene Åhsberg
Kommentar
Granskning, se SKBdoc 1387259

Sida
1(14)
Datum
2014-11-21
Ert datum
2014-09-30
Kvalitetssäkrad datum
2014-11-26
2014-11-26
Godkänd datum
2014-11-26

Svar till SSM på begäran om komplettering rörande krypprovning och modellering

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har vid möte 2014-06-25 begärt svar angående krypprovning och modellering och specifikt angående SKB:s bedömning av kryptöjning i rapporten "Analysis of creep in the copper canister due to internal and external loads" (SKBdoc 1399768) enligt följande:

Figur 10-2 anger kryptöjning (CEEQ (equivalent creep strain)). SSM undrar om detta motsvarar SKB:s töjningsmått på kravställd krypbrottöjning som härrör från enaxliga prov? Varför anges inte huvudtöjningar istället i beräkningsrapporten?

SKB anger att den största CEEQ som anges i figur 10-2 är plastisk töjning och inte kryptöjning. SSM efterfrågar ytterligare underlag som förtydligar SKB:s ställningstagande. SKB accepterar att figur 10-2 ska förtydligas och omarbetas, dessutom kommer huvudtöjningar att tas fram och redovisas för SSM (i samband med uppdatering av SKBdoc 1399768 – se nedan).

- Enligt figur 10-2 visar beräkningsresultatet höga kryptöjningar vilka överstiger föreskriven krypduktilitet för OFP-Cu (>15 %). Hur påverkar detta kopparmaterialets integritet? Kommer krypsprickor att bildas i materialet och hur utvecklas dessa över tid?*
- SSM önskar att SKB redovisar huvudtöjningarna samt ger vägledning hur resultaten (SKBdoc 1399768, figur 10-2) ska tolkas, till exempel: Hur separeras kryptöjningar och plastisk deformation, varför är inte den totala töjningen dimensionerande? Vilka dimensionskriterier ska appliceras för resultaten? Kommer krypsprickor att bildas och hur utvecklas dessa över tid?*

SKB har tidigare svarat SSM, per 2014-11-11 (SKBdoc 1452923) att redovisningarna av huvudtöjningarna enligt fråga 7 ges den 21 november, 2014.

För att ge ett tydligt svar på SSM:s frågeställningar har dessa i flera fall delats upp och redovisas i en för framställningen nedan logisk ordning.

Svensk Kärnbränslehantering AB

Box 925, 572 29 Oskarshamn
Besöksadress Gröndalsgatan 15
Telefon 0491-76 79 00 Fax 0491-76 79 30
www.skb.se
556175-2014 Säte Stockholm

Hur separeras kryptöjningar och plastisk deformation, varför är inte den totala töjningen dimensionerande?**SKB:s svar**

Vid krypprovning uppstår en initial plastisk töjning som är beroende av hur lastpåläggningen sker och storleken på den pålagda lasten. Förlängningen av provstaven som registreras under pålastningen är signifikant. Historiskt skedde pålastning manuellt och den initiala provstavs förlängningen kunde uppgå till 15 % Andersson-Östling och Sandström (2009). Under senare tid har systemet för provning utvecklats så att pålastningshastigheten kan var mycket låg och den högsta initialförlängningen som uppmäts är 23,8 %. Det som historiskt benämns krypduktilitet är förlängningen fram till brott som sker efter pålastningen. Vid de mycket låga pålastningshastigheter som numera tillämpas är inte en sådan uppdelning möjlig utan en bättre beskrivning är töjning i olika tidsskalor.

Vid FEM-simuleringarna implementeras en krypekvation som inte särskiljer plastisk- och kryptöjning utan båda processerna hanteras parallellt och den resulterande töjningen anges av CEEQ. Sammanfattningsvis är svaret på SSM:s fråga att den totala töjningen är dimensionerande och den som beräknas. Den långsamma tidsberoende töjningen måste dock beaktas extra noga med tanke på kapselns livslängd.

Figur 10-2 anger kryptöjning (CEEQ (equivalent creep strain)). SSM undrar om detta motsvarar SKB:s töjningsmått på kravställd krypbrottöjning som härrör från enaxliga prov?

SKB:s svar

Det aktuella kravet på 15 % krypduktilitet härrör från tabell 8-1 i Raiko et al. (2010) som sammanfattar de krav som kan härledas ur designanalysen. Lokala töjningar vid svetsarnas notchar (svetsskarvarna) redovisas i Raiko et al. (2010) och dessa har högre värden, se tex fig 6-11 där töjningar på 30 % beräknats med en elastoplastisk modell samt figur 6-12 som visar elastoplastisk modellering av genomförd krypprovning av CT- provstavar. Vid provningen erhöles inga tecken på anvisningskänslighet hos koppar varför 15 % kriteriet endast omfattar krav på global duktilitet.

Vid krypprovning mäts provstavens förlängning efter den inledande plasticeringen vid pålastning och detta mått används för att ange materialets krypduktilitet. Detta duktilitetsmått är enkelt att bestämma och används i många sammanhang inte minst då areakontraktionen inte är stor. Koppar uppvisar emellertid mycket påtaglig midjebildning varför de sanna töjningarna vida överstiger provstavens förlängning vid brott. En enkel metod för uppskattning av lokala töjningar (effektivtöjningar) vid brottstället är att mäta areareduktionen (Z). I Raiko et al. (2010, avsnitt 3.3) rapporteras Z-värden vid enaxlig krypprovning i intervallet 0,8-0,9. Dessa data omfattar resultat vid 75-125° C. De experimentella areareduktionerna är generellt högre vid den lägre temperauren. Det lägsta Z-värdet vid 75° C uppgår till 0,83 och finns i FSW svetsgodset Andersson-Östling och Sandström (2009). Det tillämpbara designkriteriet för kopparhöljet anges i Raiko et al. (2010) och innebär att effektivtöjningen inte får överskrida 80 % ($\epsilon_p < 0,8$). Vid konventionell dragprovning av koppar visas i SKBdoc 1393179 att detta är konservativt

och att den sanna brottöjningen vid $Z = 0,8$ motsvarar en större lokal töjning vid brott $\epsilon_f \approx 1,6$. Z-värdet 0,8 som anges i Raiko et al. (2010) är därför det mått som är adekvat vid utvärdering av FE-analys (CEEQ-värdet), vilket förlängningsmättet inte är.

Varför anges inte huvudtöjningar istället i beräkningsrapporten?

SKB:s svar

Enligt Raiko et al. (2010, avsnitt 3.3.1) är kryphastigheten och därmed kryptöjningen kontrollerad av Mises effektivspänning. SKB har därför valt att presentera effektivtöjningen. Kompletterande plottar som visar huvudtöjningarna har tagits fram och presenteras nedan.

SKB anger att den största CEEQ som anges i figur 10-2 är plastisk töjning och inte kryptöjning. SSM efterfrågar ytterligare underlag som förtydligar SKB:s ställningstagande.

SKB:s svar

Det är inte möjligt att skilja på plastisk och kryptöjning i den använda krypekvationen utan båda processerna hanteras parallellt. I rapporten försöker man uppskatta den långsamma deformationen (benämnd som traditionell krypning) och konstaterar att denna är liten jämfört med det snabbare deformationsförloppet som traditionellt betraktas som plastisk töjning.

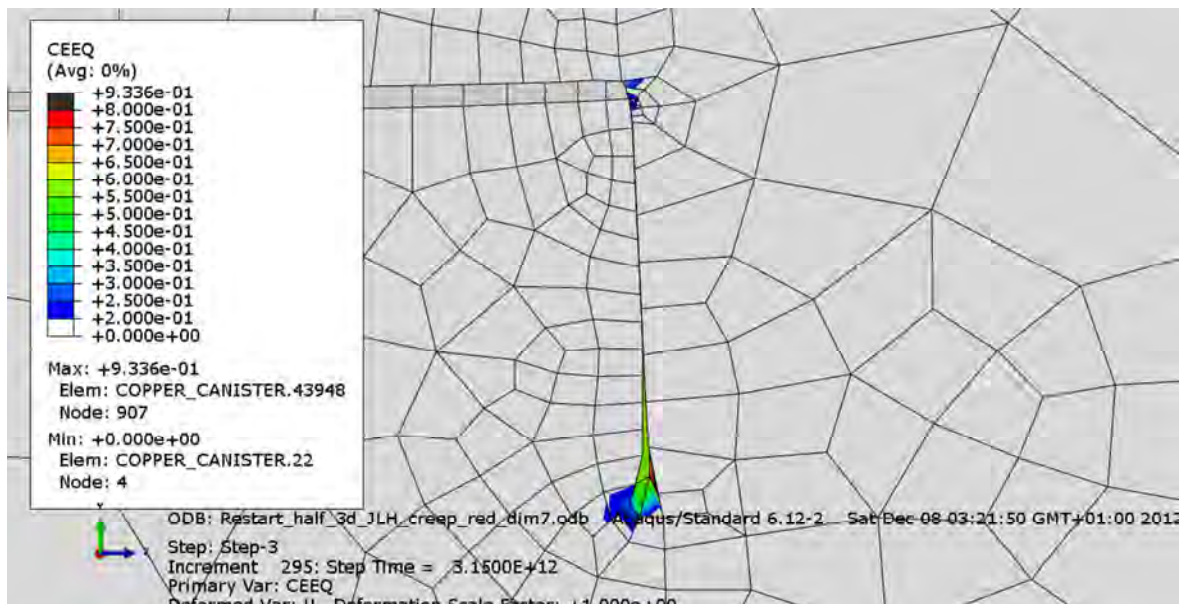
SSM önskar att SKB ger vägledning hur resultaten (SKBdoc 1399768, figur 10-2) ska tolkas.

SKB:s svar

SKB har genomfört en vidare utredning kring resultaten i SKBdoc 1399768. Som framgår av rapporten har modelleringen genomförts med två olika elementnät. Den globala modellen är tredimensionell (3D) och har lägre elementupplösning men beskriver hela kapseln, medan den axialsymmetriska modellen är tvådimensionell (2D) och har högre elementupplösning och ger därmed bättre detaljinformation. Jämförelse mellan de båda modellerna, figur 10-1 (3D) och figur 10-2 (2D), visar att de globalt ger närliggande töjningsbilder. Allmänt sett förväntas lokala töjningar vid diskontinuiteter öka med ökad elementupplösning, men i detta fall är det tvärtom. Den största töjningen sjunker från 93 % till 62 % när man går från 3D till 2D. Detta antyder att något problem föreligger i beräkningarna.

I FE-programmet Abaqus är det enbart i elementens integrationspunkter som det finns beräknade samband mellan töjningar och spänningar. Antalet integrationspunkter beror av elementtyp och i de aktuella beräkningarna används oftast full integration och lågansatselement vilket medför att det finns två integrationspunkter i varje riktning (reducerad integration har en integrationspunkt i tyngdpunkten). Konturplottarna baseras på extrapolerade värden till noderna i varje element. Dessa medelvärdesbildas därefter om

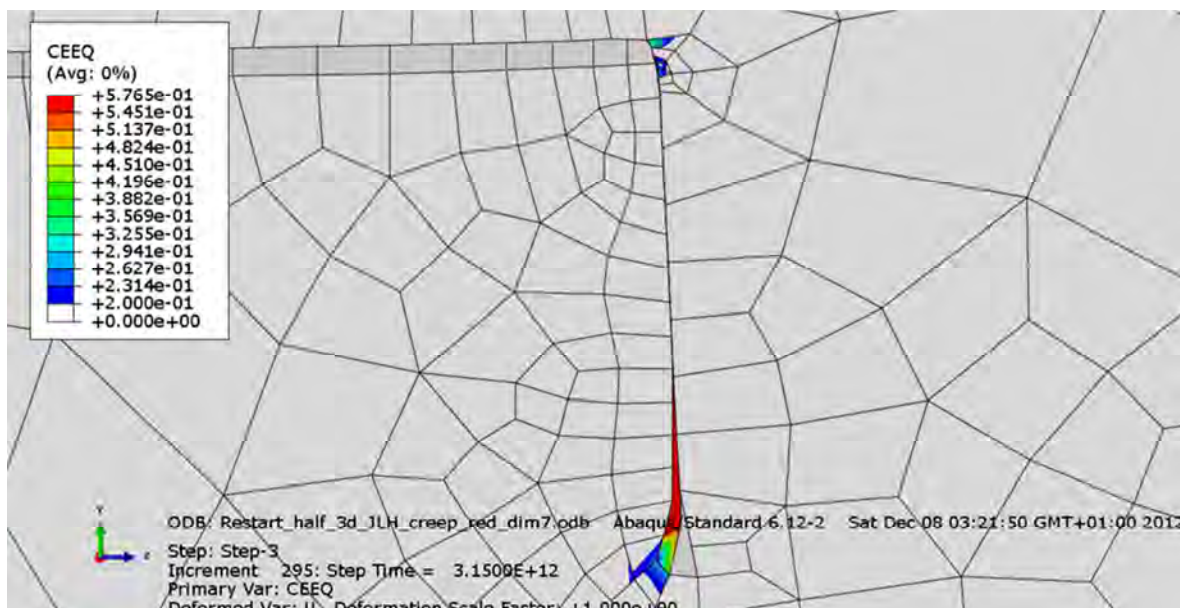
inte skillnaden är för stor. Tröskelvärdet för medelvärdesbildning sätts oftast till 75 % (anges av "avg" i rutan med färgskalan). Tröskelvärdet kan definieras till andra värden där 100 % anger att medelvärdesbildning alltid sker och 0 % att ingen medelvärdesbildning görs. Observera också att all medelvärdesbildning resulterar i en minskning av konturplottens maximala värde (såvida inte storhetens gradient är noll). För de redovisade resultaten i figur 10-2 finns maxvärden där geometrin har diskontinuiteter som resulterar i ett kraftigt deformerat element vilket har nästan singulärt värde, se figur A.



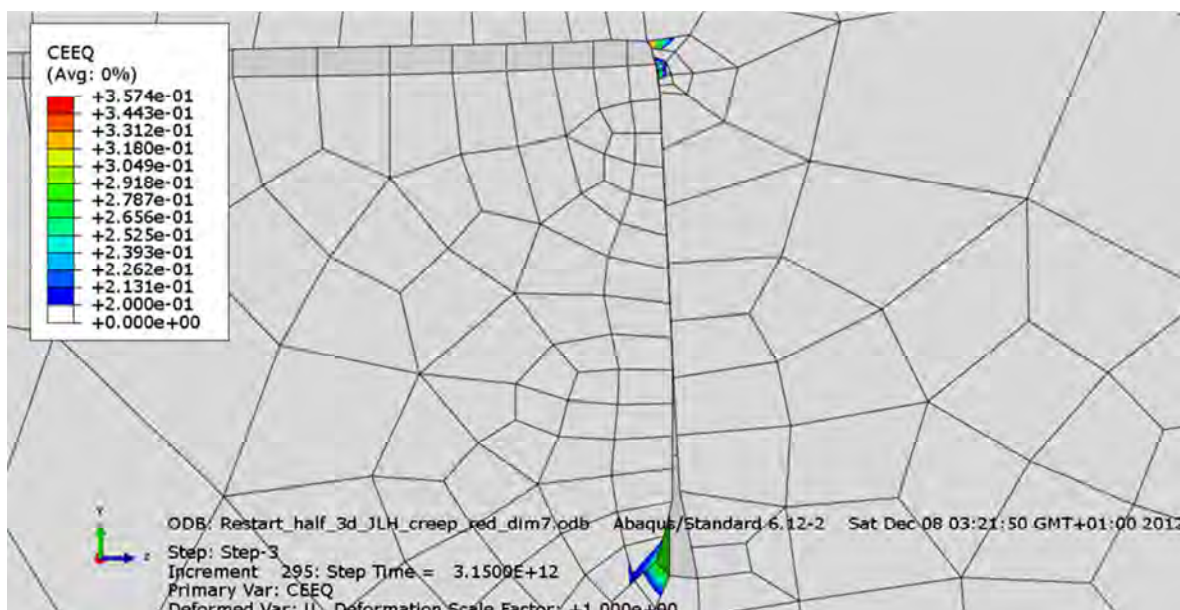
Figur A. Förstoring av figur 10-2 som visar elementnätet runt den ansatta sprickans start och slutpunkt och distorderade element. Ingen medelvärdesbildning.

För att studera hur enstaka element med höga CEEQ påverkar visas i figurerna B-1, B-2 och B-3 inverkan på töjningsbilden när element med CEEQ >80 %, >50 % samt >30 % tas bort. Dessa plottar redovisas utan medelvärdesbildning.

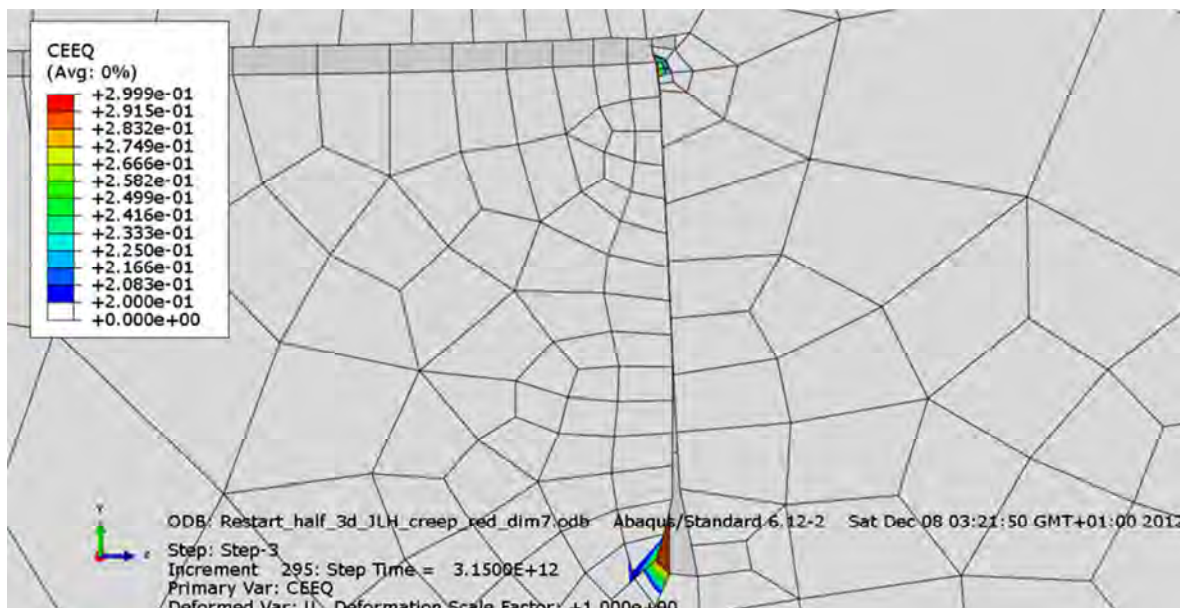
I figur B-1 är det mest distorderade elementet (rött i figur A, CEEQ >80 %) borttaget. Den lokala töjningen sjunker givetvis och blir under 58 %.



Figur B-1. Förstoring av figur 10-2 som visar töjning < 58 % runt sprickans start och slutpunkt. Elementet med CEEQ > 80 % är borttagna.



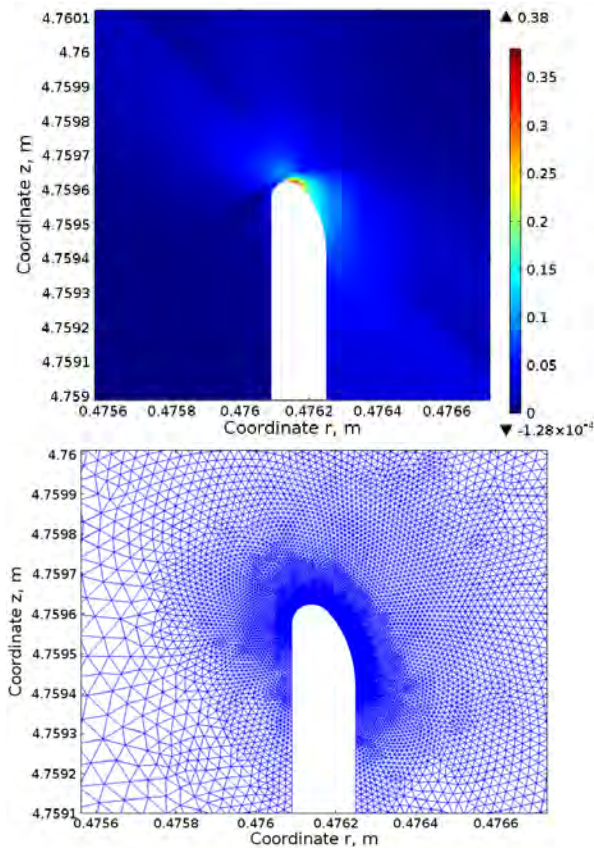
Figur B-2. Förstoring av figur 10-2, som visar töjning < 36 % runt sprickans start och slutpunkt. Elementet med CEEQ > 50 % är borttagna.



Figur B-3. Förstoring av figur 10-2, som visar töjning < 30 % runt sprickans start och slutpunkt. Element med CEEQ > 30 % borttagna.

Figurerna B-1, B-2 och B-3 illustrerar att element med extrema töjningar förekommer och har stor inverkan på den konturplott av töjningen som presenterats i figur 10-2. Av figur A framgår att flera av elementen med högst töjning är mycket kraftigt distorderade, och dessa bör inte tas med i utvärderingen. Vid borttagningen av element som tas bort i figurserien B följs inget fastlagd diskrimineringsprincip utan syftet är att illustrera att enstaka element vid diskontinuiteterna har höga töjningsvärden.

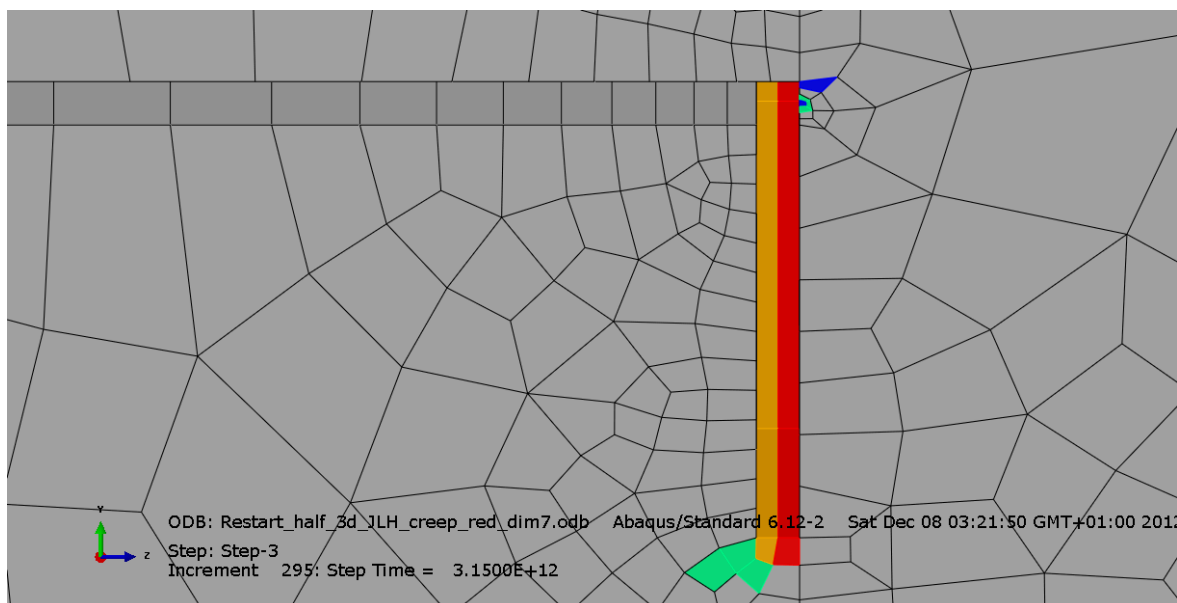
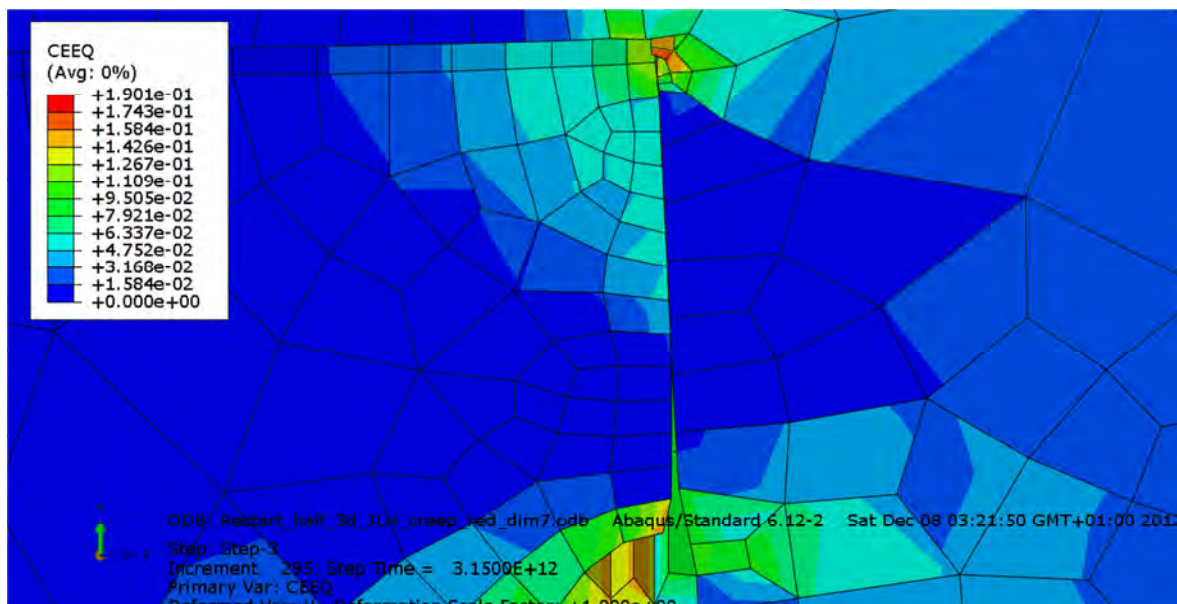
För att studera inverkan av elementnätets upplösning på spännings/töjningsbilden vid de geometriska diskontinuiteterna kan en jämförelse göras mot Jin och Sandström (2013) som dock endast analyserar isostatlast upp till 15 MPa (skedet fram till glaciation). Geometrin som analyseras är den vertikala skarven, men utan ansatt spricka. Det som gör jämförelsen intressant är den extremt fina elementupplösningen (ned till $3,9 \times 10^{-3}$ mm). De största beräknade töjningarna i Jin och Sandström (2013) (38 %) är av samma storleksordning som det högst påkända elementet i motsvarande område i figur B-2 (35 %). Utbredningen av det påkända området är enligt simuleringen presenterad i Jin och Sandström (2013) mycket litet, storleksordningen 0,01 mm (se figur C), att jämföras med kornstorleken i svetsen som typiskt är 0,07 mm. Elementindelningen i 2D-modellen som används i SKBdoc 1399768 är inte tillräckligt fin för att hantera så lokala töjningskoncentrationer.



Figur C. Överst, utbredning av plastisk deformation i den vertikala skarven vid isostatisk tryck 15 MPa. Nederst den vertikala skarven modellerad med ett extremt fint elementnät. Skarvens bredd är 0,16 mm. (Figur 3-18 Jin och Sandström 2013).

Vid mycket skarpa anvisningar (geometriska singulariteter) t ex en sprickspets behöver elementnätets upplösning alltid vara finare än den ansatta defektgeometrin för att undvika att enskilda element ger felaktiga värden. Jin och Sandström (2013) visar att vid en avrundning med radie på ca 0,08 mm blir töjningens utbredning mycket liten och saknar betydelse. Givet den ansatta defektgeometrin i SKBdoc 1399768 och elementnätets upplösning är töjningsvärdena närmast de geometriska diskontinuiteterna som återfinns i figur 10-2 osäkra.

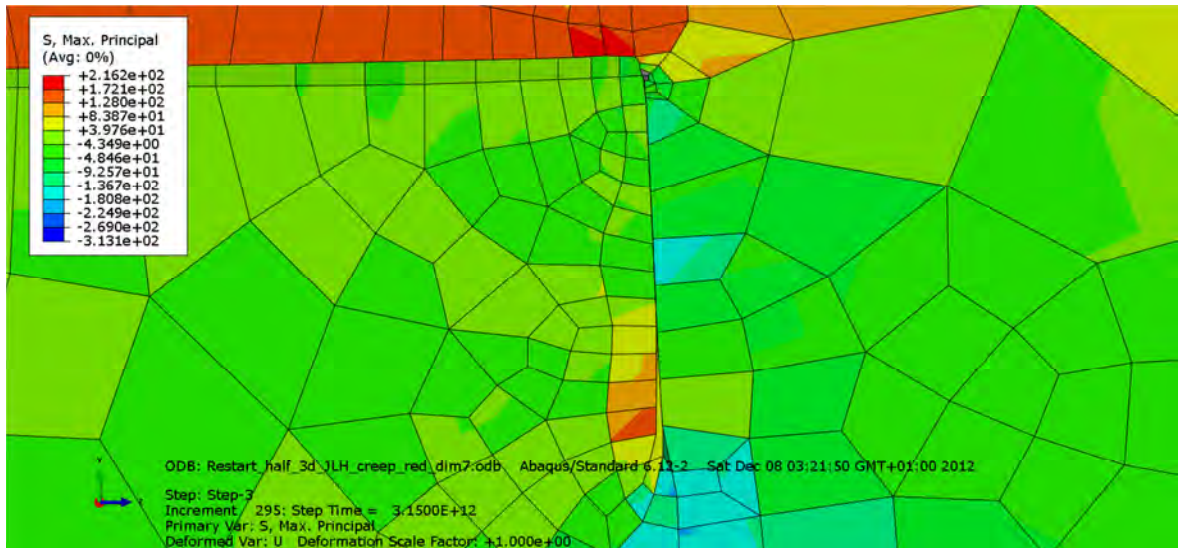
För att få en uppskattning av osäkerheten vid bestämningen av töjningarna i det aktuella området visas en modifierad konturplott i figur D där resultat från element med extremt höga värden vid diskontinuiteterna tagits bort ur plotten. Detta syftar endast till att kvalitativt visa hur konturplotten påverkas av de element som kan befaras vara störda.



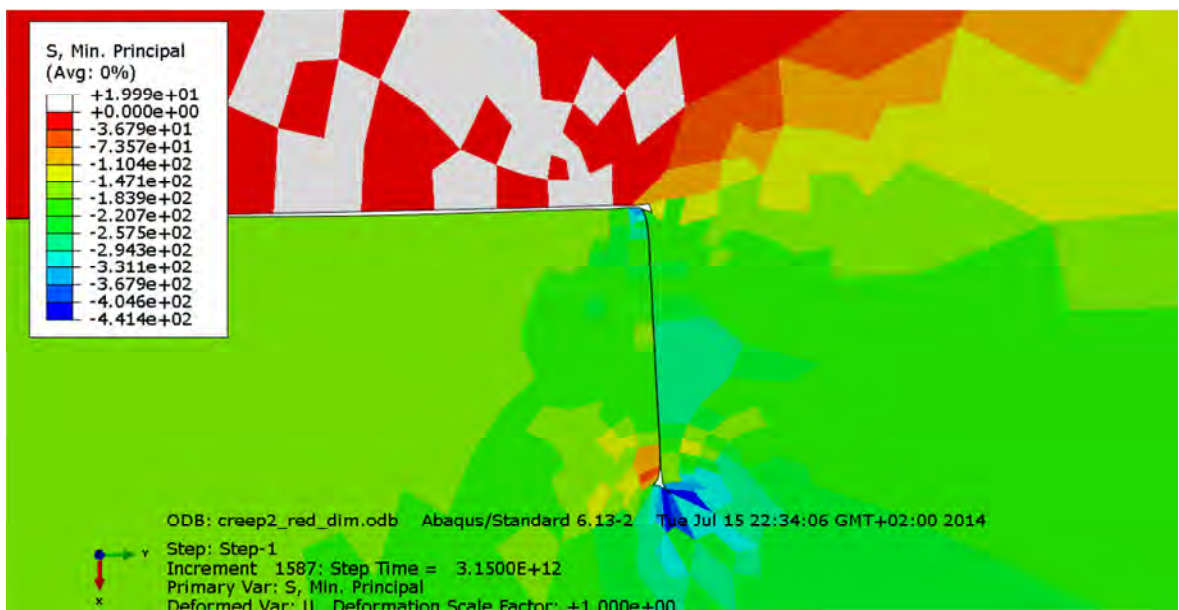
Figur D. Förstoring av figur 10-2. Överst visas töjningarna i anslutning till de geometriska diskontinuiteterna med borttagna element med $CEEQ > 20\%$. Nederst visas elementen som tagits bort före konturplottning (rött $>80\%$, orange $>50\%$, blått $>30\%$ samt grönt $>20\%$). Den högsta töjningen blir vid detta förfarande är 19% .

Redovisning av spänningar

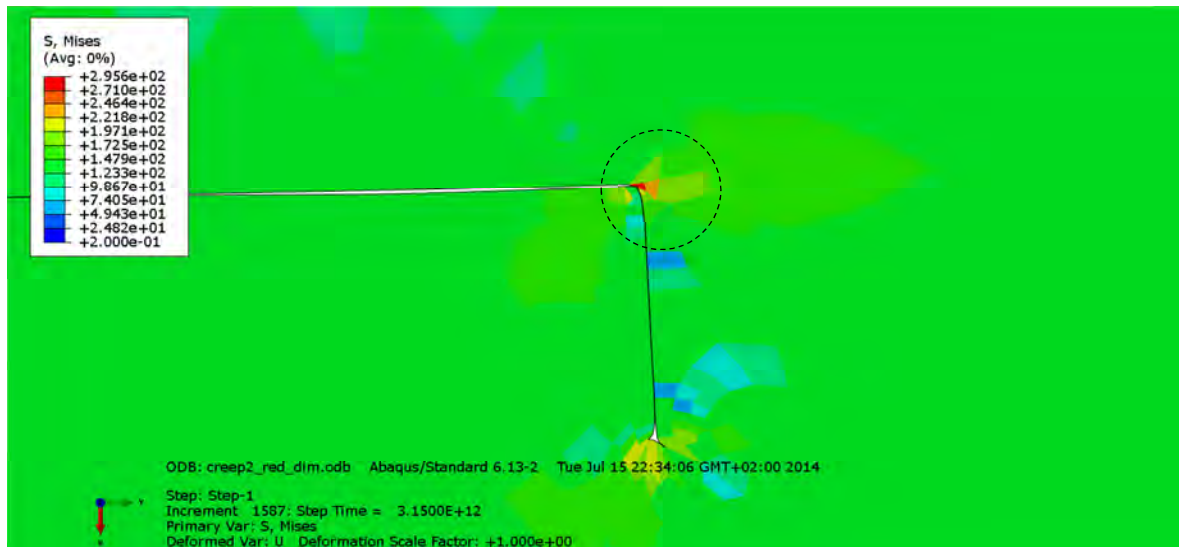
Huvudspänningarna och effektivspänningarna i det intressanta området redovisas i figurserien E. Överlag ses inga element med extrema värden vilket är logiskt eftersom den använda materialmodellen innebär att stora utslag i töjningen svarar mot små förändringar i spänningen. Samtliga konturplottar är redovisade utan medelvärdesbildning.



Figur E-1. Konturplott som visar största huvudspänning som motsvarar töjningen i figur 10-2. Inga element borttagna.



Figur E-2. Konturplott som visar minsta huvudspänning som motsvarar töjningen i figur 10-2. Inga element är borttagna.



Figur E-3. Konturplott som visar effektivspänningen som motsvarar töjningen i figur 10-2. Inga element är borttagna. Området markerat med högst effektivspänning är markerat med cirkel.

Kommentar

De kompressiva huvudspänningarna är betydligt högre och mer utbredda än dragspänningarna.

Effektivspänningen är högst vid den vertikala svets skarvens avslutning och lägre vid den ansatta sprickspetsen. Omvänt, den plastiska effektivtöjningen som kopplar till effektivspänningen blir lägre i sprickspetsen än vid skarvens avslut. Detta område (inringat i figur E-3) svarar mot det modellerade området i figur C ur Jin och Sandström (2013).

Kommer krypsprickor att bildas och hur utvecklas dessa över tid?**SKB:s svar**

Frågan är naturlig med tanke på de stora kryptöjningar som redovisats i SKBdoc 1399768. I framställningen ovan visas att det utsatta området har en mycket begränsad utbredning. Utbredningen är i själva verket så liten att den är mindre än kristallkornen. Så lokala töjningar kan inte ge upphov till en propagerande krypspricka, eftersom det krävs en utbredning över flera korn för propagering och dessutom högre temperaturer. Av SKBdoc 1399768 och även av figur E-1 och E-2, framgår dessutom att spänningarna kring områden med höga töjningar är kompressiva vilket omöjliggör sprickpropagering. Även Jin och Sandström (2013) visar att spänningarna är kompressiva i svetsområdet.

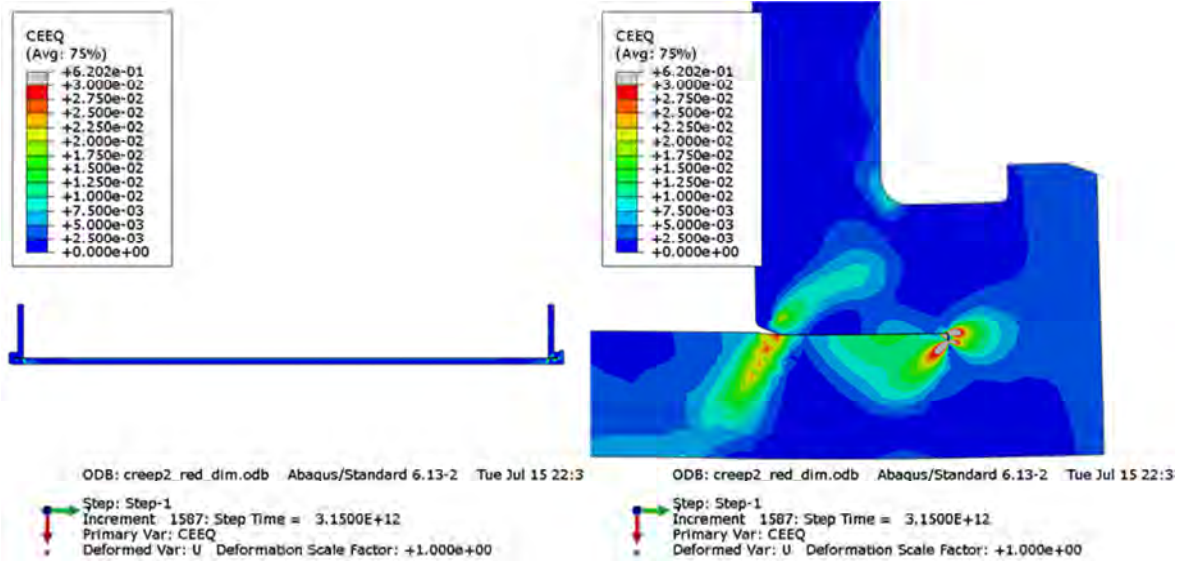
Försök med att initiera krypsprickor vid Swerea KIMAB har visat att sprickinitiering och propagering endast sker vid temperaturer över 100°C och under dragspänningar med stark treaxlighet Wu et al. (2013). CT-provstavar har testats vid KIMAB vid 20° C och 75° C med utpräglat segt beteende, se Raiko et al. (2010). Dessutom finns två undersökningar av koppars brottseghet som inte visar några tecken på sprickbildning vid 75° C, se SKBdoc 1187725. Samtliga dessa prover visar ett mycket segt beteende hos kopparen. Sprickbildning kan därför, av flera skäl, inte uppstå.

Vilka dimensionskriterier ska appliceras för resultaten?**SKB:s svar**

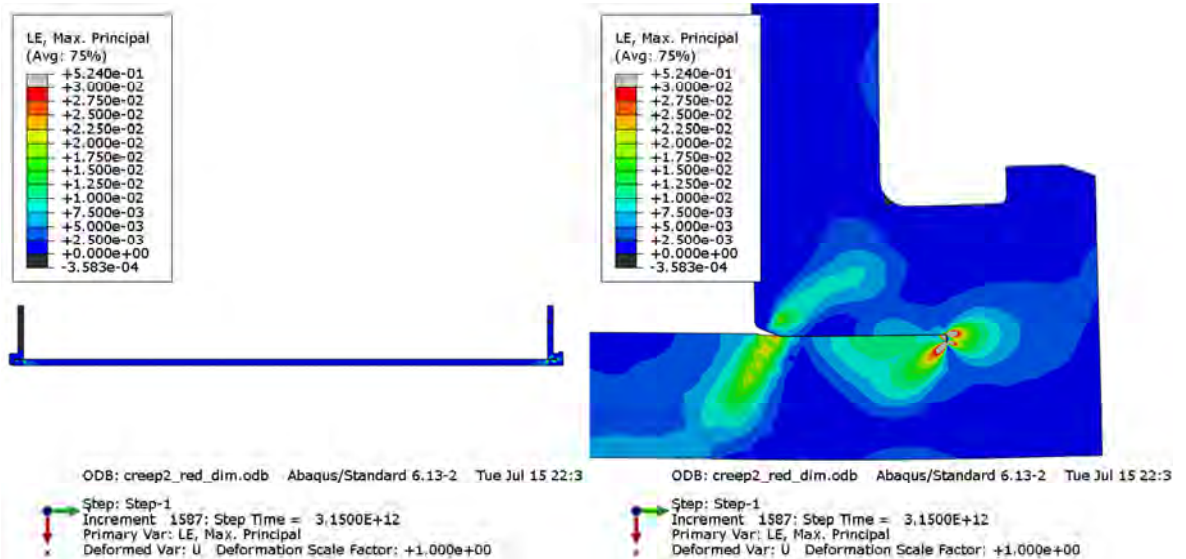
Det bör påpekas att den plastiska töjningens storlek, även om den är svårbestämd vid modelleringen, åtminstone kan sägas vara mindre än kryptöjningskriteriet, $\epsilon_p < 80\%$ som är det tillämpbara kriteriet.

Kompletterande töjningsplottar

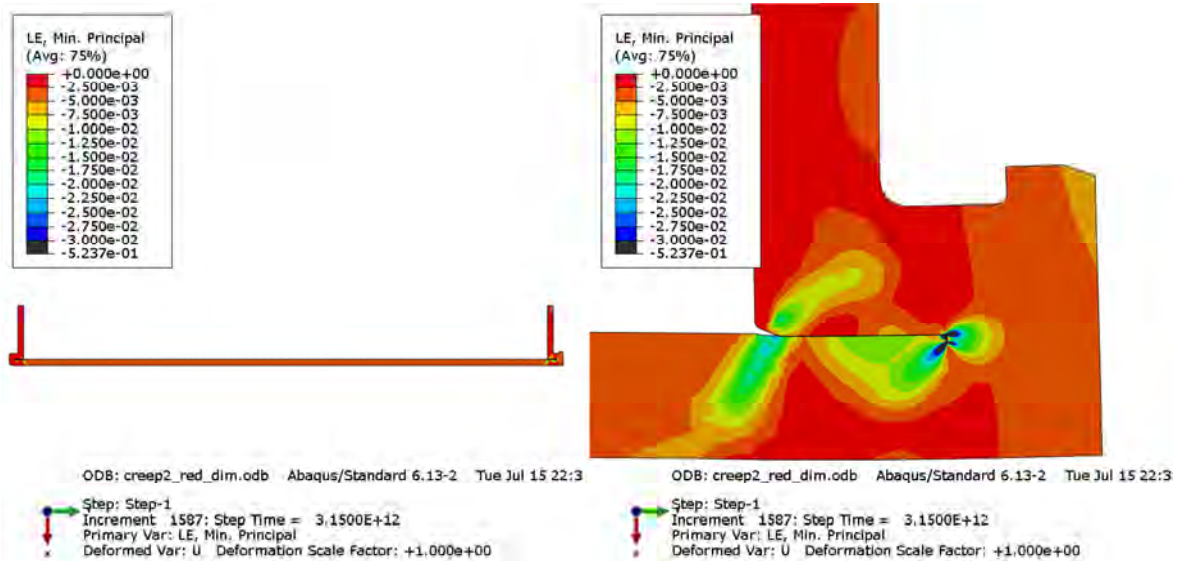
SSM har efterfrågat huvudtöjningarna. Dessa visas för det mest intressanta fallet enligt figur 10-2. Figurer benämnda G och H. Figur G visar största huvudtöjningen och figur H minsta huvudtöjningen. För att underlätta tolkningen bifogas även figur 10-2 från SKBdoc 1399768 dvs den konturplott som visar effektivtöjningen, nedan benämnd figur F.



Figur F. Effektivtöjningen (CEEQ) i kopparhöljet vid 60 MPa isostattryck, axisymmetrisk modell (2D). (Figur 10-2 i SKBdoc 1399768).



Figur G. Konturplott som visar största huvudtöjningen vid 60 MPa isostattryck inkluderande alla element samt med 75 % tröskelvärde för medelvärdesbildning.



Figur H. Konturplott som visar minsta huvudtöjningen inkluderande alla element samt tröskelvärde 75 % för medelvärdesbildning.

Kommentar

Vid jämförelse av figurerna G och H framgår att största och minsta huvudtöjningarna är nära nog identiska vilket kan förväntas, eftersom töjningen ur planet är liten och de plastiska töjningarna är baserade på oförändrad volym.

Med vänlig hälsning

Helene Åhsberg
Projektledare Tillståndsprövning

Referenser

Andersson-Östling H C M, Sandström R, 2009. Survey of creep properties of copper intended for nuclear waste disposal. SKB TR-09-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Jin L-Z, Sandström R, 2013. Influences of load variations on the plastic deformation in friction stir welds and contour slits in copper shells. SKB TR-13-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Raiko H, Sandström R, Rydén H, Johansson M, 2010. Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wu R, Sandström R, Jin L-Z, 2013. Creep crack growth in phosphorus alloyed oxygen free copper. Materials Science and Engineering A 583, 151–160.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1187725 ver 1.0	Fracture toughness testing of Copper cylinder T31 and lidweld FSWL27	Bodycote Testing Ltd., 2008
1393179 ver 1.0	A constitutive model for texture dependent deformation hardening and pressure dependent initiation of ductile failure in metallic materials	TrueStress Engineering, 2013
1399768 ver 1.0	Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads	SKB, 2014