



DokumentID  
1452923

Ärende

Strålsäkerhetsmyndigheten  
Att: Ansi Gerhardsson  
171 16 Stockholm

Handläggare  
Jan Sarnet  
Er referens  
SSM2011-1137-64  
Kvalitetssäkrad av  
Helene Åhsberg  
Godkänd av  
Martin Sjölund  
Kommentar  
Granskning se SKBdoc id 1387259

Sida  
1(10)  
Datum  
2015-02-20  
Ert datum  
2014-09-30  
Kvalitetssäkrad datum  
2015-02-27  
Godkänd datum  
2015-02-27

## Svar till SSM på frågor i protokollet från kapselavstämningsmötet 25 juni 2014

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i protokoll från Avstämningsmöte mellan SSM och SKB avseende kapselns mekaniska integritet, tillverkningsaspekter och kryprelaterade frågor från den 25 juni 2014 (SSM2011-1137-64) sammanfattat tio kvarstående frågor och har från Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, efterfrågat en handlingsplan för hur och när frågorna kan besvaras.

En kompletterande fråga har efter avstämningsmöte den 2 oktober (anteckningar se, SSM2011-1137-74) också getts via mail den 17 oktober 2014.

I november besvarade SKB vissa av frågorna och redovisade en plan för när och hur de kvarstående frågorna skulle komma att hanteras punkt för punkt. Nedan ges uppdaterade svar på frågorna.

***1. SKB kommer att se över om eventuella förtydligande kan göras med hänsyn till SSM:s bekymmer kring oklarheter i hur statistiska data används för att kontrollera kvalitet hos insatsen samt dess konsekvenser för den kommande uppdateringen av designanalysen.***

### SKB:s svar

SKB ha låtit genomföra en statistisk utvärdering av hur antalet provstavar från toppen av segjärnsinsatser påverkar bedömningen av risken för att någon del av insatsen inte uppfyller de uppställda kraven. Utvärderingen rapporteras i bilaga 1. Huvuddelen av rapporten behandlar brottförlängningsvärden från dragprovning där mycket data finns tillgängliga. Analyserna visar att det finns en systematisk variation i materialegenskaper i vertikal (axiell) ledd. Spridningen mellan olika insatser uppvisar en så stor variation att konservativa antaganden måste göras vid prediktering av en viss insats enbart utgående från data från toppen. Ett konservativt antagande för BWR insatser är att toppskivan representerar hela insatsens kvalitet.

Ur statistisk synpunkt krävs ett fåtal prov för att säkerställa toppskivans egenskaper med de fördelningar som erhållits vid undersökningar av fem provtillverkade BWR insatser (I53–I57). Närmare information om dessa insatser ges i SKBdoc 1432361, avsnitt 7.2.1 och avsnitt 7.2.2. Till exempel ger sex prover en sannolikhet  $< 0,01$  % att något värde ligger under 7 % förlängning i den aktuella volymen i toppskivan men det krävs ett mycket stort antal prov för att bringa ner risken för hela insatsen med detta angreppssätt.

För PWR insatser är bilden snarlik. Studien omfattar tre PWR insatser (IP23–IP25). Närmare information kring dessa insatser ges i SKBdoc 1432361 avsnitt 7.2.1 och avsnitt 7.2.2.

För brottseghetsvärden finns inte samma omfattande underlag varför analysen av predikering utgående från data från toppskivan inte kan göras i nuläget. För att genomföra en analys liknande den som gäller förlängningsvärden behöver bland annat den axiella fördelningen hos brottsegheten beskrivas.

För att minska riskerna måste således variationsbredden i segjärnets egenskaper reduceras och gjutprocessens utfall bli mindre slumpmässig. I rapporten analyseras flera fall avseende effekten av minskad variation (standardavvikelse) och ökat medelvärde på predikeringar utgående från prov i toppskivan. Vidare diskuteras strategier avseende processkvalificering bland annat för att kunna beskriva den förväntade statistiska fördelningen för batch-tillverkade insatser.

I samband med den genomgången av kravbilden för segjärnsinsatserna kommer kraven på brottförlängning och brottseghet att ses över. I rapporten studeras därför olika krav på brottförlängning och hur dessa inverkar på de statistiska förutsägelsena.

SKB har dessutom genomfört en variansanalys för brottförlängningen för BWR- och PWR-insatser. Analysen kommer att publiceras av SKB under våren 2015.

***2. Kompletterande analyser av acceptabla defektstorlekar i olika delar av kapselns tvärsnitt och i olika vinklar i förhållande till kapselns symmetriaxel beräknas vara klara under oktober 2014.***

**SKB:s svar**

För skjuvlastfallet har SKB i rapporten av Hernelind (2010) vid globalsimuleringen av kapselns respons vid skjuvning, gjort förenklingen att kanalrören av stål är idealt centrerade i insatsen. I en ytterligare rapport (SKBdoc 1415152) redovisas den mekaniska responsen för BWR- och PWR-insatserna då kanalrören modellerats låsta till segjärnet. PWR-modellen utformades så att kanalrören är placerade med en maximalt tillåten avvikelse på 10 mm med avseende på centrering, vilket medför en tunnare godstjocklek vid ett kanalrörshörn än för fallet då kanalrören är centrerade. Motsvarande beräkningsmodell för BWR skapades med 20 mm avvikelse med avseende på centrering i (SKBdoc 1415152). Jämförelse har därefter gjorts med avseende på spänningar och töjningar vid det dimensionerande skjuvlastfallet, det så kallade 75 %-fallet. För BWR var den axiella dragspänningen ca 333 MPa i Hernelind (2010) och cirka 395 MPa enligt tabell 9-14 i (SKBdoc 1415152).

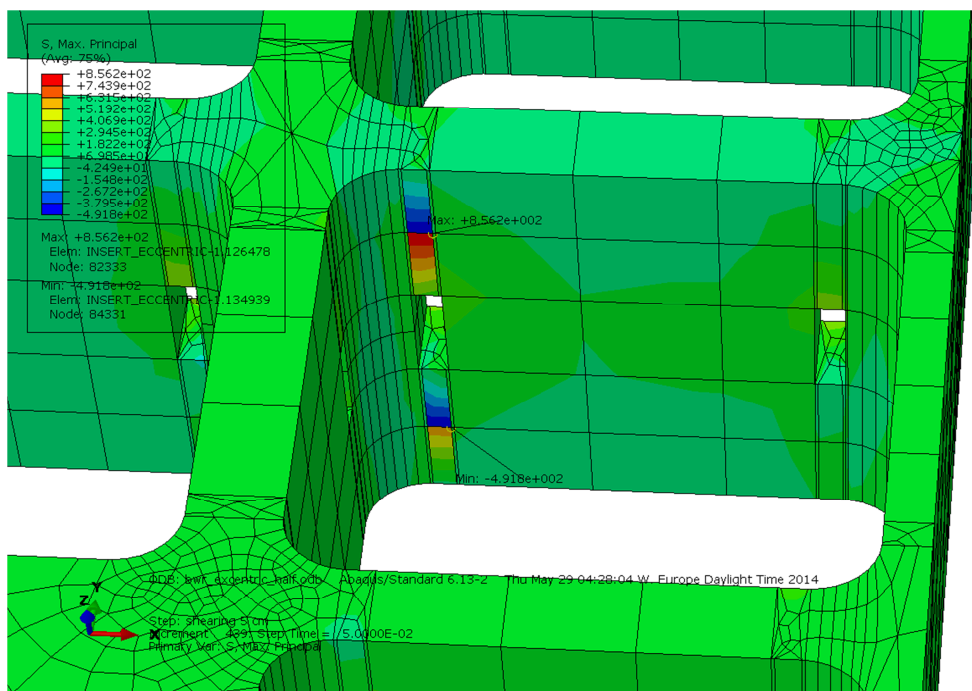
Nya globalanalyser har genomförts med olika detaljeringsgrad, inverkan av stagplåtar mellan kanaler, excentriskt placerade kanaler. Olika kontaktvillkor mellan kanaler och segjärn har också undersökts liksom inverkan av dragspänning på grund av hur skjuvplanet angriper kapseln i ringled.

#### *BWR-insatsen*

SKB har gått vidare med att förbättra beräkningsmodellen för BWR-kapseln. Den resulterande dragspänningen i insatsen som en funktion av skjuvplanets angreppspunkt i ringled på kapseln har också undersökts. Beräkningarna, bilaga 2, har utförts med en maximalt tillåten avvikelse på 10 mm med avseende på centrerings. Därtill har svetsen mellan stagplåtarna och kanaler modellen till skillnad från tidigare då endast de fogberedda plåtarna varit med i modellen.

Den detaljerade modelleringen av insatserna innebär en stor beräkningsmässig utmaning för att skapa ett fungerande elementnät som konvergerar med rimliga lösningstider. För att åstadkomma detta har elementupplösningen varierats över insatsens tvärsnitt. Utläsning av exempelvis spänningsnivåer måste därför ske med viss försiktighet och kompletterande analyser kan behövas för att i mer detalj kunna värdera dessa. Vid skapandet av elementnätet har det exempelvis varit nödvändigt att på vissa ställen använda kilformade element som kan ge missvisande resultat. Enstaka element vid geometriska diskontinuiteter har blivit grovt distorderade och ofysikaliska värden har erhållits. SKB instämmer därför i SSM:s tveksamhet till att inte uppdatera skadetålighetsanalysen. En noggrann värdering av resultaten i bilaga 2 som avser BWR har därför genomförts med avseende på skadetålighet, se bilaga 3.

I figur 1 visas ett exempel på ofysikaliska värden från globalsimuleringen. Den största huvudspänningen visas i figuren och lokalt uppgår den till 856 MPa. Detta värde är dock inte representativt utan är en effekt av alltför styva kilformade finita element. Jämförelse mellan resultaten i Hernelind (2010) och i bilaga 2 visar att den styrande axiella dragspänningen, 333 MPa är den samma i båda analyserna.



**Figur 1.** Huvudspänningar för beräkningsmodellen av BWR-insatsen där stålrörskassetten inklusive stagplåtar inte visas.

Resultatet från bilaga 3 visar att resultatet av de beräkningar som beskrivs i bilaga 2 respektive i Hernelind (2010) har samma storlek på axiell spänning i områdena av vikt för en skadetålighetsanalys. De acceptabla defektstorlekar som sammanställts i Dillströms och Bolinders rapport (2010) kvarstår, varför inte heller kravbilden för oförstörande provning av BWR-insatsen påverkas.

#### *PWR-insatsen*

Simuleringarna av PWR-insatsen visar endast små skillnader i resultat mellan de redovisade simuleringarna i Hernelind (2010) respektive (SKBdoc 1415152). SKB har valt att skapa en ny rapport som baserar sig på (SKBdoc 1415152) för att redovisa resultaten från detaljmodelleringen av PWR. Den resulterade dragspänningen i insatsen som en funktion av skjuvplanetts angreppspunkt i ringled på kapseln har också undersökts. Denna nya rapport med globala simuleringar återfinns som bilaga 4 till detta svarsdokument. Därtill har resultaten i bilaga 4 värderats med avseende på skadetålighet, se bilaga 5.

Bilaga 5 visar att de beräkningar som beskrivs i bilaga 4 respektive i Hernelinds rapport (2010) ger samma storlek på axiell spänning i områdena av vikt för en skadetålighetsanalys. De acceptabla defektstorlekar som erhållits tidigare (SKBdoc 1288288) kvarstår, varför inte heller kravbilden för oförstörande provning av PWR-insatsen.

#### *Slutsatser*

Skjuvlastfallet har analyserats med globala analyser för BWR- och PWR-insatserna. Dessa globala analyser utgör i sin tur indata till skadetålighetsanalyser för respektive insats.

Inverkan av resultaten från globalmodellerna har därefter värderats med avseende på behovet av kompletterande analyser av acceptabla defektstorlekar i olika delar av kapselns tvärsnitt och i olika vinklar i förhållande till kapselns symmetriaxel för respektive insats. Resultatet av värderingen visar att skadetålighetsanalyserna samt kravbilden för

oförstörande provning inte behöver förändras på grund av resultaten de genomförda detaljerade analyserna.

***3. SKB återkommer med tidplan angående SSM:s begäran kring inverkan av koppertjocklek på kapselns designanalys (SSM2011-2426-172).***

**SKB:s svar**

SKB har utrett inverkan av koppertjocklek på kapselns designanalys och redovisar resultaten i "Svar till SSM på begäran om komplettering rörande inverkan av koppertjocklek på kapselns designanalys", SKBdoc 1471540 ver 1.0.

***4. Om SKB vill påverka SSM:s uppfattning av en samlad kravbild avseende kapselns mekaniska integritet finns det möjlighet att göra en reviderad samlad redovisning, men ingen vidare formell komplettering på denna fråga kommer att begäras.***

**SKB:s svar**

SKB arbetar med en samlad kravbild på kapselns mekaniska integritet motiverad genom skadetålighetsanalys och defektstorlekar som behöver detekteras med OFP. SKB har tagit fram en statusrapport kring detta som beskriver kravnivåer, framtagning och uppdatering av krav, relation mellan olika krav, nivå på nuvarande krav samt planer på uppdatering av krav. Detta dokument redovisas härmed som bilaga 6.

***5. SSM kommer att skicka en kompletteringsbegäran avseende skadetålighetsanalys för stållocket i augusti och det förväntas att SKB ska utreda frågan under hösten.***

**SKB:s svar**

SKB har utrett behovet av skadetålighetsanalys och redovisar resultaten i den uppdaterade versionen av "Svar till SSM på begäran om komplettering rörande skadetålighetsanalys av stållock till gjutjärnsinsats", SKBdoc 1449528 ver 2.0.

***6. SSM önskar att SKB förklarar vilka krav på acceptanskriterium [som] finns för syrehalten under svetsning samt hur detta påverkar oxid-uppbyggnaden i svetsområdet.***

**SKB:s svar**

Tidigare arbete som presenterats i ansökan (SKB 2010) visar att svetsar utförda i luft kan uppfylla kraven med avseende på korrosion samt mekaniska egenskaper. Men SKB anser ändå att andelen oxidpartiklar i svetszonen bör kunna styras mot en nivå som motsvarar grundmaterialet.

Ett SKB-projekt startat under 2014 ska ta fram underlag för ett acceptanskriterium för syrehalten i gasskyddet under svetsning. Nedan följer en beskrivning av aktiviteterna i detta projekt. För det första har ett nytt, förbättrat, gasskydd installerats på

Kapsellaboratoriets friktionsomrörningssvetsmaskin. Detta nya gasskydd, baserat på Pehkonens (2014) examensarbete, möjliggör svetsförsök med kontrollerbara syrehalter. Syrehalter på 50–60 ppm kan nås i gasskyddet.

Svetsar för att undersöka förekomsten av oxider under fullgott gasskydd kommer att utföras. Målet är att hålla en sådan syrenivå i gasskyddet så att oxidtjockleken på fogytorna hålls i samma storleksordning som den som bildas i luft innan svetsning, ungefär 10 nanometer enligt en tidigare rapport (SKBdoc 1407846). Lämplig nivå har undersökts och presenteras i bilaga 7. I denna bilaga diskuteras även inverkan av olika syrenivåer i gasskyddet på oxid-uppbyggnaden i svetsområdet. Rengöringsstudier pågår för att underbygga rengöringsmetoder av fogytorna. Därefter kommer ett processfönster för mängden oxidpartiklar tas fram. En möjlig undersökningsmetod är föroxidering av fogytor till en bestämd grad och därefter svetsning under gasskydd för att förhindra ytterligare oxidering. Dessa svetsprov kommer undersökas metallografiskt samt kryp- och korrosionsprovas. Baserat på dessa undersökningar kan sedan ett processfönster för syrehalten under svetsning tas fram och redovisas i PSAR.

### ***7. SSM önskar att SKB redovisar huvudtöjningarna samt ger vägledning hur resultaten från krypförsök ska tolkas.***

#### **SKB:s svar**

I en uppdaterad version av spänningsberäkningen för kopparhöljet under isostatisk last finns ytterligare redovisning av huvudtöjningarna där riktningar och storlek hos dessa förtydligas, se bilaga 8. Färgskalorna i konturplottarna är nu anpassade så att det går att läsa ut aktuella töjningar i figurerna. Vidare har konturplottar för påkända områden i kopparhöljets bottenområde tagits fram. Dessa presenteras på motsvarande sätt som i lockområdet. För de detaljerade konturplottarna finns det ett obelastat elementnät att jämföra mot.

Vägledning för hur resultat från krypförsök ska tolkas ges i bilaga 9 där påverkan på brotttöjningen  $\epsilon_f$  från graden av treaxlighet i spänningstillståndet har undersökts. Treaxlighet definieras som kvoten mellan hydrostatiska trycket (alternativt medelspänningen) och effektivspänningen enligt von Mises och anges som  $T$ . Av figur 3-8 i bilaga 9 framgår att vid ett treaxligt spänningstillstånd där  $T \geq 0,8$ , närmar sig  $\epsilon_f$  det uppställda kriteriet som anger att  $\epsilon_p$  inte får vara större än 80 %. SKB har därför undersökt graden av treaxlighet i kopparhöljet för de belastningar som beräknats i bilaga 8. Resultaten presenteras som konturplottar i version 2.0 av rapporten, bilaga 8. Treaxligheten  $T$  uppgår maximalt till 0,55 i kopparhöljet vid den aktuella belastningen. Enligt bilaga 9 motsvarar detta  $\epsilon_f = 1,3$ . Detta innebär att det finns god marginal mellan det uppställda kriteriet  $\epsilon_p < 0,8$  och materialets brotttöjning vid den aktuella graden av treaxligt spänningstillstånd. Ett av områdena där  $T$  når sitt största värde motsvarar det inringade område som SSM önskat få bättre beskrivet. Det element som har högst töjning där har CEEQ värdet  $< 30\%$  ( $\epsilon_p < 0,3$ ) vilket på intet sätt äventyrar kopparhöljets integritet. Övriga områden i kopparhöljet med förhöjd treaxlighet har låga töjningsvärden.

Området vid kopparlockets svetsrot där de högsta töjningsvärdena erhållits kännetecknas av låga värden på  $T$ .

CEEQ summerar samtliga inkrementella töjningar (i tre dimensioner). Definitionen av CEEQ framgår av ABAQUS Manual (2012):

#### CEEQ

Equivalent creep strain, defined as  $\int_0^t \dot{\epsilon}^{cr} dt$ .

The definition of  $\dot{\epsilon}^{cr}$  depends on the material model. For classical metal (Mises) creep  $\dot{\epsilon}^{cr} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^{cr} : \dot{\epsilon}^{cr}}$ .

Den aktuella materialmodellen baseras på krypprovning utförd vid Swerea KIMAB. Materialmodellen beskrivs av en konstitutiv ekvation utvecklad av Rolf Sandström, se Sandström och Andersson (2008), Jin och Sandström (2008) och Jin och Sandström (2009). I materialmodellen förenas både plasticitet och kryptöjning.

### **8. SKB återkommer med förslag till eventuella sätt att besvara SSM:s kvarstående frågor kring mekanismer som avgör fosfors effekt på duktilitet.**

#### SKB:s svar

Den 21 november 2014 lämnade SKB in ”Svar till SSM på begäran om komplettering rörande fosfors inverkan på koppars krypegenskaper”, SKBdoc 1457514 version 1.0 vilket ger en beskrivning av den pågående forskning som bedrivs för att utreda mekanismen för fosfors inverkan på koppars krypegenskaper.

**9. SSM anser att SKB bör bevisa att gropen från MiniCan-försöket (vilka framgår i figur 3-11 i SKB R-13-35) verkligen är en tillverkningsdefekt som uppkommit då U-böjproven 2 tillverkats. Vidare rekommenderar myndigheten att sprickorna i WOL1 och WOL2 prover bör brytas upp och brottyorna analyseras. SKB anger att de har varit i kontakt med AMEC (f.d. Serco) angående detta men inte beställt några ytterligare undersökningar i enlighet med SSM:s önskemål. SSM vidhåller vikten att dessa prov analyseras med avseende på gropens morfologi samt sprickyornas utseende för WOL proven.**

#### SKB:s svar

Kontakter har tagits med Amec och ytterligare analyser på Minican-prover påbörjades under hösten 2014. Analyser pågår och beräknas rapporteras under våren 2015.

**10. SSM vill gärna veta när SKB rapporten R-13-50 (rörande bestrålning av gjutna segjärn) kommer att publiceras.**

#### SKB:s svar (från november 2014)

Rapporten publicerades i september 2014 och finns tillgänglig på [www.skb.se](http://www.skb.se).

**Kompletterande fråga via mail:**

*Det står i avsnitt 10.1.2 av rapporten SKBdoc 1434744 (Non-destructive testing of canister components and welds) att "The volume between the channel tubes was not considered in the development of inspection techniques for "crack-like" defects because no acceptance criteria relevant to the internal loads (due to rock shearing) have been formulated". SSM skulle vilja att SKB förklarar vad menas med detta med tanke på att under avsnitt 4 definieras ett antal acceptanskriterier för sprickliknande defekter i detta område (zon C).*

**SKB:s svar**

SKB ser att några förtydliganden skulle kunna föras in i kap 10.1.2.

- Avsnitt 10.1.2 uppdateras med en kommentar avseende det ursprungliga kravet på axiella sprickor i område C mellan kanälrören (isostatiska lastfallet). Dessa relativt lindriga krav på att hitta defekter som täcker minst 80 % (kanske mer) av godstjockleken med en längd i dm-skala bedömer SKB som möjliga att detektera då både en pulseko- och en transmissionsprovning appliceras.
- Kraven som presenteras i Tabell 4-3 är enbart baserade på beräkningar i områden utanför område C.

Rapporten (SKBdoc 1434744) har nu uppdaterats till version 2.0 se bilaga till Svar till SSM på begäran om förtydligande rörande kontroll och provning (SKBdoc 1471002).

Med vänlig hälsning

**Svensk Kärnbränslehantering AB**  
Avdelning Kärnbränsleprogrammet

Helene Åhsberg  
Projektledare Tillståndsprovning

**Bilagor**

1. Statistisk analys av brottförlängning och brottseghet för BWR- och PWR insatser SKBdoc 1464317 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering.
2. Detailed models for BWR-canisters for Earthquake induced rock shearing. SKBdoc 1439722 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
3. Damage tolerance analysis of BWR-canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced rock shear load – Influence of using more detailed models. SKBdoc 1450913 ver 1.0 Inspecta Technology, 2014.
4. Detailed models for PWR-canisters for Earthquake induced rock shearing. SKBdoc 1439730 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
5. Damage tolerance analysis of PWR-canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced rock shear load – Influence of using more detailed models. SKBdoc 1459222 ver 1.0, Inspecta Technology 2015.



6. Samlad kravbild avseende kapselns mekaniska integritet. SKBdoc 1471283 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
7. Estimation of oxide growth on joint surfaces during FSW. SKBdoc 1402837 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
8. Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads. SKBdoc 1399768 version 2.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.
9. A constitutive model for texture dependent deformation hardening and pressure dependent initiation of ductile failure in metallic materials. SKBdoc 1393179 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## Referenser

### *Referenser i ansökan*

**Dillström P, Bolinder T, 2010.** Damage tolerance analysis of canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced rock shear load. SKB TR-10-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Hernelind J, 2010.** Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load. SKB TR-10-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010,** Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

### *Övriga referenser*

**ABAQUS Manuals, 2012.** Version 6.12.1. Dassault Systèmes Simulia Corp.

**Jin L-Z, Sandström R, 2008.** Creep of copper canisters in power-law breakdown. Computational Materials Science 43, 403–416.

**Pehkonen H, 2014,** Design av gasskydd för friktionsomrörningssvetsningsmaskin Examensarbete LIU-IEI-TEK-A—14/01934-SE Intuitionen för ekonomisk och industriell utveckling, Linköpings universitet.

**Sandström R, Andersson H C M, 2008.** Creep in phosphorus alloyed copper during power-law breakdown. Journal of Nuclear Materials 372, 76–88.

### *Opublicerade dokument*

**SKBdoc 1288288 ver 2.0.** Analysis of PWR canister inserts using data acquired from PWR material. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKBdoc 1407846 ver 1.0.** Undersökning av rengöringsmetoder och oxidation av kopparytor i ädelgas med GD-OES. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKBdoc 1415152 ver 2.0.** Detailed models for PWR- and BWR-canisters for Earthquake induced rock shearing. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKBdoc 1432361 ver 1.0.** Manufacturing and testing of nodular cast iron inserts. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKBdoc 1449528 ver 2.0.** Svar till SSM på begäran om komplettering rörande skadetålighetsanalys av stållock till gjutjärnsinsats. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKBdoc 1457514 ver 1.0.** Svar till SSM på begäran om komplettering rörande fosfors inverkan på koppars krypegenskaper. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKBdoc 1471540 ver 1.0.** Svar till SSM på begäran om komplettering rörande inverkan av koppartjocklek på kapselns designanalys, SKBdoc 1471540 ver 1.0.

## Revisionsförteckning

Version	Datum	Revideringen omfattar	Utförd av	Kvalitetssäkrad	Godkänd
3.0	Se sidhuvud	Punkt 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 besvarade. Övriga svar (utom fråga 10) justerade.	Jan Sarnet	Se sidhuvud	Se sidhuvud
2.0	2014-11-11	Punkt 3 och 8 justerade.	Jan Sarnet	Jan Eckerlid	Helene Åhsberg
1.0	2014-11-10	Planen skapad	Jan Sarnet	Jan Eckerlid	Helene Åhsberg