



DokumentID 1471283	Version 1.0	Status Godkänt	Reg nr	Sida 1 (36)
Författare Johan Andersson, Mikael Jonsson Lena Morén, Karin Pers Ulf Ronneteg, Jan Sarnet			Datum 2014-12-01	
Kvalitetssäkrad av Jan Eckerlid Helene Åhsberg			Kvalitetssäkrad datum 2015-03-19 2015-03-19	
Godkänd av Martin Sjölund			Godkänd datum 2015-03-19	

Samlad kravbild avseende kapseln

Innehåll

1	Inledning	3
1.1	Bakgrund	3
1.2	Syfte.....	3
2	Kravhantering och kravstruktur	3
2.1	Systematisk kravhantering.....	3
2.2	Kravstruktur och kravformulering för KBS-3-förvaret	4
2.3	Konstruktion och utvärdering av kravuppfyllelse	5
2.3.1	Konstruktion och konstruktionens kravuppfyllelse.....	5
2.3.2	Produktion och kvalificeringsprocessen	6
3	Konstruktionsförutsättningar relaterade till kapseln säkerhet efter förslutning	8
3.1	Kapselns funktioner i slutförvaret	8
3.2	Planerad revision av konstruktionsförutsättningar som påverkar kapseln.....	8
3.2.1	Buffertens svälltryck och skjuvhållfasthet	9
3.2.2	Revision av isostatisk last på kapseln	10
3.2.3	Skjuvbelastning på kapseln	11
4	Kapselns referensutformning	11
4.1	Insatsens referensutformning.....	12
4.1.1	Materialsammansättning	12
4.1.2	Materialegenskaper	12
4.1.3	Dimensioner	13
4.1.4	Stållock till BWR- och PWR insatsen.....	13
4.2	Referensutformning för kopparhöljet	14
4.2.1	Materialsammansättning	14
4.2.2	Materialegenskaper	14
4.2.3	Dimensioner	15
5	Analys av referenskapseln	15
5.1	Analys av kapselns referensutformning och acceptabla defekter.....	15
5.2	Mekanisk belastning – isostatiskt lastfall	17
5.2.1	Analys av insatsens hållfasthet.....	17
5.2.2	Analys av stållocket	19
5.2.3	Analys av kopparhöljet.....	19

5.3	Mekanisk belastning – skjuvlast.....	20
5.3.1	Skadetålighetsanalys av insatsen.....	20
5.3.2	Analys av stållocket	21
5.3.3	Beräkning av elasto-plastisk deformation för kopparhöljet	21
5.4	Mekanisk belastning - kombinationen av isostatisk last och skjuvlast.....	22
5.5	Korrosionsangrepp.....	22
5.6	Kriticitet.....	23
5.7	Planer för fortsatt arbete	23
6	Kontroll och styrning av egenskaper i produktionen.....	23
6.1	Gjutning av segjärnsinsats	24
6.1.1	Materialsammansättning	24
6.1.2	Materialegenskaper	24
6.1.3	Dimensioner	26
6.1.4	Defekter.....	26
6.2	Tillverkning av stållock	27
6.3	Tillverkning av kopparkomponenter	27
6.3.1	Materialsammansättning	27
6.3.2	Materialegenskaper	28
6.3.3	Dimensioner	28
6.3.4	Defekter.....	29
6.4	Svetsning av kopparhöljet	30
6.4.1	Materialsammansättning	30
6.4.2	Materialegenskaper	31
6.4.3	Dimensioner	31
6.4.4	Defekter.....	31
6.5	Planer för fortsatt arbete	31
7	Slutsatser	33
	Referenser	34

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Strålsäkerhetsmyndigheten har inom ramen för tillståndsärendet för Kärnbränsleförvaret identifierat ett antal kvarstående frågeställningar om den samlade kravbilden för kapseln, speciellt avseende dess mekaniska integritet.

Den redovisning avseende kapseln som SKB lämnat till SSM inom tillståndsärendet omfattar dokumentationen i ansökan till exempel SR-Site (SKB 2011) och produktionsrapporten för kapsel (SKB 2010a) med referenser samt ett flertal kompletteringar som svar på frågor från SSM vilka behandlar

- kapselns mekaniska integritet
- tillverkningsaspekter
- redovisning avseende kontroll och provning av kapseln och dess delar
- långsiktiga degraderingsprocesser.

1.2 Syfte

Syftet med denna PM är att redovisa den samlade kravbilden för kapseln och hur den har vidareutvecklats sedan ansökan lämnades in och hur SKB kommer att fortsätta detta arbete inför den kommande preliminära säkerhetsredovisningen (PSAR) för Kärnbränsleförvaret. Med samlad kravbild för kapseln avses de krav och förutsättningar som ligger till grund för kapselns konstruktion, tillverkning och provning satta i sitt sammanhang, dels utifrån kapselns betydelse för KBS-3-förvarets säkerhet under drift och efter förslutning, dels utifrån krav på tillämpning av beprövad eller väl utprovad teknik. PM:en omfattar följande:

- Redovisning av kravhantering, kravstruktur och utvärdering av krav på olika detaljeringsnivå i KBS-3-förvarets utformning (avsnitt 2).
- En genomgång av konstruktionsförutsättningar relaterade till kapselns säkerhet efter förslutning, med tonvikt på de uppdateringar som planeras inför PSAR (avsnitt 3).
- En beskrivning av kapselns referensutformning, inklusive de uppdateringar som gjorts i kompletteringar inlämnade till SSM (avsnitt 4).
- Sammanfattning av de analyser som genomförts i ansökan och därefter för att verifiera att referenskapseln uppfyller konstruktionsförutsättningarna (avsnitt 5).
- En sammanfattande genomgång av SKB:s planer för hur produktionen av kapseln ska kontrolleras och styras för att säkerställa att de producerade kapslarna uppfyller specifikationerna i referensutformningen (avsnitt 6).
- Slutsatser ges i avsnitt 7

Inom ramen för PSAR för Kärnbränsleförvaret kommer SKB att redovisa en uppdaterad och vidareutvecklad produktionsrapport inklusive uppdaterad designanalys för kapseln inför fortsatt planering och genomförande av kvalificeringen av produktions- och kontrollsystemet.

2 Kravhantering och kravstruktur

2.1 Systematisk kravhantering

För Kärnbränsleförvaret arbetar SKB med krav enligt en systematik där kraven i författningar är utgångspunkten för krav på KBS-3-förvarsanläggningens respektive KBS-3-förvarets funktioner.

Dessa utgör sedan grunden för krav på utformningen eller konstruktionen av byggnadsdelar, system, komponenter och anordningar i anläggningen samt för tekniska barriärer och bergutrymmen i slutförvaret.

Inom ramarna för den systematiska kravhanteringen omsätts grundläggande strålsäkerhetsprinciper samt krav i författningar till krav på KBS-3-förvarets funktioner och övriga krav och förutsättningar för dess konstruktion och utveckling. Syftet med systematisk kravhantering är att visa hur SKB avser säkerställa att KBS-3-förvaret under konstruktion och utveckling, uppförande och drift samt efter avveckling och förslutning uppfyller samtliga ställda krav.

Kravhanteringen är ett verktyg för kvalitetssäkring och för dokumentation av hur KBS-3-förvaret och den teknik som används för att producera det successivt utvecklas och kvalitetssäkras. I linje med krav i SSMFS 2008:1 och ISO 9001 utvecklas såväl kravhantering som KBS-3-förvarets utformning och metoder för tillverkning och kontroll successivt i syfte att ständigt förbättra kvalitet och strålsäkerhet.

I ansökan beskrivs metodiken för kravhantering och kravstruktur i SKB (2010b). I rapporten redovisas även de krav på KBS-3-förvarets respektive på de tekniska barriärernas och bergutrymmenas funktioner som SKB har formulerat baserat på författningar och valet av KBS-3-metoden. Hur konstruktionsförutsättningar för KBS-3-förvarets olika delar (kapseln, bufferten, återfyllningen, pluggen, förslutningen och bergutrymmena) tas fram baserat på analysen av säkerheten efter förslutning beskrivs i SR-Site (SKB 2011, kapitel 5) och SKB (2009). Utformningskrav, kravställda egenskaper och förutsättningarna som styr konstruktionen redovisas i produktionsrapporterna, för kapseln i SKB (2010a). För att sätta utformningskraven i sitt sammanhang upprepas kraven på funktioner i produktionsrapporterna.

Sedan ansökan lämnades in har SKB vidareutvecklat metodik och tillämpning av kravhantering och avser även att förtydliga befintliga konstruktionsförutsättningar och lägga till nya. Detta kommer att redovisas i PSAR för Kärnbränsleförvaret.

2.2 Kravstruktur och kravformulering för KBS-3-förvaret

Krav på de funktioner som det färdiga KBS-3-förvaret ska upprätthålla på lång sikt utgår från SSM:s krav på att ett slutförvar ska ha ett system av passiva barriärer som innesluter, förhindrar eller fördröjer spridning av radioaktiva ämnen. I KBS-3-förvaret upprätthålls funktionerna av de tekniska barriärernas, bergets och bergutrymmenas egenskaper. Egenskaperna beror i sin tur på en uppsättning designparametrar som genom styrning och provning kan fastställas i produktionen. Utifrån denna succesiva detaljering i KBS-3-förvarets utformning och förståelsen för bergets och de tekniska barriärernas utveckling på lång sikt har SKB preciserat krav och förutsättningar som de tekniska barriärernas och bergutrymmenas egenskaper och designparametrar ska uppfylla och överensstämna med vid deponering.

I KBS-3-förvaret ska funktionerna upprätthållas under lång tid. De krav som utformningen med sina egenskaper och designparametrar ska uppfylla vid deponering för att funktionerna ska kunna upprätthållas på lång sikt baseras på resultat av analyser av KBS-3-förvarets strålsäkerhet efter förslutning. Kraven på konstruktion och utveckling av KBS-3-förvarets tekniska barriärer och bergutrymmen kan också ha andra källor, till exempel

- det använda kärnbränslets egenskaper
- förvarsplatsens egenskaper
- konstruktionsstyrande händelser från analysen av säkerheten under anläggningens drift
- förutsättningar för analyser av strålsäkerheten under anläggningens drift som påverkar deras giltighet eller slutsatser
- verksamheterna inom KBS-3 systemets anläggningar och transportsystemet
- andra delar i anläggning eller slutförvar.

Konstruktionsförutsättningar används som en gemensam benämning för krav och förutsättningar som ligger till grund för konstruktionen.

De krav som kopplar till strålsäkerhet efter förslutning utgår ifrån SSM:s riskkriterium. Som framgår av kapitel 8 i SR-Site är detta det övergripande kriteriet för att utvärdera slutförvarets strålsäkerhet. En detaljerad och kvantitativ förståelse och utvärdering av förvarets strålsäkerhet kräver en utförligare beskrivning av hur de övergripande säkerhetsfunktionerna ”inneslutning” och ”fördröjning” upprätthålls av förvarets system av passiva barriärer.

Grundat på förståelsen av barriärsystemets egenskaper och utvecklingen av systemet på lång sikt har dessa övergripande säkerhetsfunktioner i säkerhetsanalysen delats upp i ett antal delfunktioner för kapseln, bufferten, återfyllningen i deponeringstunnlar och berget. De säkerhetsfunktioner som identifierats för kapselns inneslutande förmåga är att utgöra korrosionsbarriär, att motstå isostatisk last och att motstå skjuvlast.

Säkerhetsfunktionerna utvärderas över tid genom att varje säkerhetsfunktion kopplas till en säkerhetsfunktionsindikator, det vill säga en egenskap hos den aktuella delen i barriärsystemet som kan beräknas eller som på annat sätt kan uppskattas. För flera säkerhetsfunktionsindikatorer är det också möjligt att ange kvantitativa kriterier. Om en säkerhetsfunktionsindikator uppfyller kriteriet, upprätthålls den aktuella säkerhetsfunktionen. Kapselns förmåga att stå emot isostatisk last är ett exempel på en säkerhetsfunktion. Den tillhörande indikatorn är den isostatiska belastningen på kapseln och kriteriet är att den isostatiska belastning som kapseln utsätts för inte är större än den last den har visats kunna stå emot. En avvikelse från ett kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator betyder inte att förvaret är osäkert, utan snarare att noggrannare analyser och ytterligare data behövs för att kunna utvärdera strålsäkerheten. Kriterierna är ett hjälpmedel för att fastställa om strålsäkerhet upprätthålls. Om kriterierna är uppfyllda underlättas säkerhetsutvärderingen. Om alla kriterier relaterade till kapselbrott är uppfyllda medför detta att det övergripande riskkriteriet är uppfyllt, förutsatt att alla typer av kapselbrott har identifierats.

Eftersom säkerhetsfunktionerna med sina kriterier ger en struktur för hur slutförvarets olika barriärer bidrar till strålsäkerheten utgör de också en av flera viktiga grunder för att formulera konstruktionsförutsättningar. Kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna är dock inte desamma som konstruktionsförutsättningarna. De förra ska optimalt upprätthållas under den period som omfattas av analysen av säkerheten efter förslutning, medan konstruktionsförutsättningarna ska uppfyllas initialt då den aktuella delen i förvaret slutligt färdigställts. Konstruktionsförutsättningarna ska i allmänhet säkerställa att barriärsystemet är tillräckligt robust för att uppfylla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna över tid. Kopparkapseln måste exempelvis utformas på ett sådant sätt att dess initiala tjocklek (konstruktionsförutsättningen) säkerställer att den står emot korrosion under mycket lång tid, det vill säga att tjockleken är större än noll (funktionsindikatorkriteriet) under denna tid. De krav som anges i konstruktionsförutsättningarna måste därför vara strikt uppfyllda vid installation.

2.3 Konstruktion och utvärdering av kravuppfyllelse

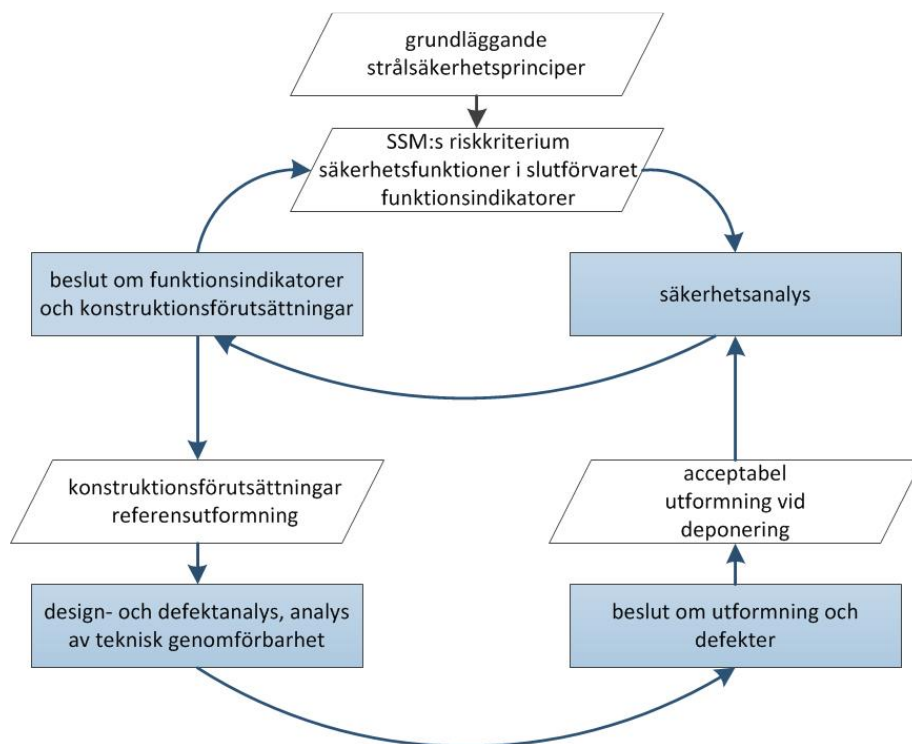
2.3.1 Konstruktion och konstruktionens kravuppfyllelse

Generellt vidareutvecklas konstruktionsförutsättningar och utformning successivt. Arbetet med konstruktion och utveckling och utvärdering av kravuppfyllelse kan beskrivas som en iterativ process. Det gäller både KBS-3-förvaret som helhet och kapseln. Det går inte att bestämma en utformning direkt från konstruktionsförutsättningarna, istället beskrivs en utformning och därefter analyseras dess förmåga att uppfylla ställda krav.

Iterationerna omfattar dels hela KBS-3-förvaret och dels de olika delarna i barriärsystemet. Iterationerna fortsätter tills det finns en utformning som uppfyller kraven och som bygger på beprövad eller väl utprovad teknik. Om det bedöms svårt att hitta eller producera en utformning som uppfyller kraven ställs frågan om det är möjligt att modifiera konstruktionsförutsättningarna utan att den beräknade radiologiska risken för förvaret ökar signifikant i jämförelse med tidigare utvärdering av säkerheten efter förslutning. (Risken får under inga förhållanden överstiga SSM:s riskkriterium). Därefter vidtar förnyade analyser om huruvida föreslagna utformningar kan uppfylla de modifierade

konstruktionsförutsättningarna. Inom ramarna för analyserna av utformningens förmåga att uppfylla konstruktionsförutsättningarna kan olika detaljer läggas till eller varieras.

Analysernas resultat och slutsatser används för att vidareutveckla utformning och konstruktionsförutsättningar. Den iterativa processen för konstruktion och utveckling med loopar för hela KBS-3-förvaret inklusive kapseln illustreras i Figur 2-1.



Figur 2-1. Illustration av den iterativa process där konstruktionsförutsättningar och utformning successivt utvecklas och förbättras.

Kapslarna ska uppfylla konstruktionsförutsättningarna då de slutligt deponeras i KBS-3-förvaret. Innan produktionen av kapslar kan inledas ska det verifieras att kapslarna i sin referensutformning (se avsnitt 4), och med hänsyn till de defekter som kan uppstå under produktion och hantering (se avsnitt 6), uppfyller ställda krav. Detta görs inom ramarna av en uppsättning design- och defektanalyser vilka beskrivs mer utförligt i avsnitt 5. I designanalysen analyseras förmågan hos kapselns referensutformning att motstå de mekaniska belastningar som ges av konstruktionsförutsättningarna. Designanalysen omfattar också skadetålighetsanalyser för att bestämma storleken på acceptabla så kallade beräkningsdefekter. I skadetålighetsanalyser inkluderas en uppsättning beräkningsdefekter i de områden av kapselkomponenterna som utsätts för spänningar och töjningar vid de analyserade belastningarna. En defektanalys omfattar bland annat en kartläggning av de defekter som kan förväntas förekomma i kapselns olika komponenter. Denna kartläggning baseras på så väl observationer från egen provtillverkning som defektbeskrivningar i litteratur eller standarder.

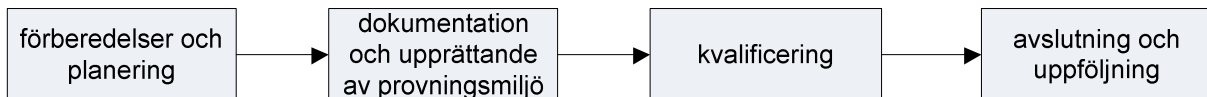
2.3.2 Produktion och kvalificeringsprocessen

Den kapselutformning som fastställs enligt avsnitt 2.3.1 ska kunna produceras så att de färdiga kapslarna överensstämmer med den fastställda utformningen. De tillverknings- och provningsprocesser som SKB avser tillämpa redovisas i avsnitt 6. Innan produktionen kan inledas ska de visas vara dugliga och ha god förmåga att åstadkomma och kvalitetssäkra kapslar som överensstämmer med fastställd utformning.

Tillverknings- och provningsprocessers förmåga att uppfylla sina specificerade uppgifter demonstreras i kvalificeringar. I ansökan ges en kort övergripande beskrivning av hur SKB avser genomföra kvalificeringsprocesser i SKB (2010b, avsnitt 5.3). I inlämnade kompletteringar presenteras en mer utförlig plan för kvalificeringar omfattande KBS-3-förvarets samtliga delar (SKBdoc 1365182). Det planerade kvalitetsledningssystemet för kapseln beskrivs i SKBdoc 1388095 och planer för genomförande av kvalificering av oförstörande provning i SKBdoc 1414464.

SKB arbetar med en generell beskrivning av kvalificeringsprocessen och en överblick över det planerade genomförandet ges i Figur 2-2. SKB arbetar vidare med att beskriva hur krav på genomförande av kvalificeringsprocessen ska styras av komponenternas betydelse för KBS-3-förvarets strålsäkerhet samt av den planerade produktionen och möjligheterna att använda beprövad teknik.

Kvalificeringen av varje tillverknings- eller provningsprocess anpassas till den tillverkade eller provade komponentens betydelse för strålsäkerheten, tillgänglig beprövad teknik, tillgängliga standarder och normer samt de förhållanden som kommer att råda, såväl fysiska som organisatoriska, vid genomförandet i den planerade produktionen. Det innebär att varje kvalificeringsprocess kommer att genomföras som ett unikt projekt, där några i princip enbart pekar på de standarder och normer som ska tillämpas medan andra kräver omfattande analyser och genomförande av demonstrationer. Såväl övergripande beskrivning som planerat genomförande av enskilda kvalificeringsprocesser kommer att redovisas i PSAR.



Figur 2-2. Överblick över huvudsteg i den planerade kvalificeringsprocess som ska genomföras för processer för tillverkning och provning.

Förberedelser och planering

Kvalificeringen av kapselns processer för tillverkning och provning befinner sig idag i förberedelse- och planeringssteget. Kvalificeringarna ska genomföras i projekt. Förberedelser och planering omfattar bland annat att fastställa handläggare för kvalificeringsprojektet i fråga samt eventuellt deltagande och roll för tredje part. Vidare ingår beredning av tekniskt underlag samt fastställande av kvalificeringsalternativ och plan för genomförande av kvalificeringen. I beredning av tekniskt underlag ingår resultat från design- och defektanalyser (se avsnitt 5.1). Där ingår också att beskriva de tekniska, fysiska och organisatoriska förhållanden som kommer att råda vid tillverkning och provning och som kan påverka dess resultat, samt med detta och tillgänglig beprövad teknik som bas, att ange en plan för hur kvalificeringen ska genomföras.

Jämfört med situationen vid kärnkraftverk bör noteras att slutförvarets barriärer inte tillåter provning efter genomförd installation. För att kvalitetssäkra slutförvaret planerar SKB att kombinera styrning av tillverkningsprocesser och provning. Acceptanskriterier för tillverkningsprocessers duglighet kommer att ställas så att deras förmåga att leverera färdigställda och installerade tekniska barriärer som uppfyller ställda krav kan säkerställas. Vid tillverkning kommer åtgärder att vidtas om processparametrar ligger utanför sina styrgränser. Kontroll inför godkännande kommer att omfatta såväl provning av produkter som genomförd styrning och mätning av tillverknings- och installationsprocesser. Detta förfarande för kvalitetstyrning och kontroll är vanligt i många andra riskkritiska industriella tillämpningar, som till exempel vid läkemedelstillverkning.

Dokumentation och upprättande av provningsmiljö

I steget dokumentation och upprättande av provningsmiljö upprättas en preliminär teknisk motivering för den aktuella tillverknings- och provningsprocessen. Vidare upprättas den kvalificeringsmiljö där kvalificeringen ska genomföras och procedur samt acceptanskriterier för själva kvalificeringen fastställs. Att upprätta kvalificeringsmiljön omfattar, beroende på vad som ska kvalificeras, att upprätta lokaler och tekniska system för kvalificeringen, att anskaffa eventuella provkroppar och testblock samt att ange och träna involverad personal.

Kvalificering

Genomförandet av själva kvalificeringen kan ske i ett eller flera steg beroende på den aktuella processens komplexitet avseende såväl teknik och organisation som den miljö där den kvalificerade tillverkningen eller provningen ska genomföras.

Avslutning och uppföljning

Kvalificeringsprocessen avslutas med en sammanställning av erfarenheter och färdigställande av hela kvalificeringsprocessens dokumentation i en kvalificeringsakt.

3 Konstruktionsförutsättningar relaterade till kapseln säkerhet efter förslutning

3.1 Kapselns funktioner i slutförvaret

Kapselns viktigaste funktioner i KBS-3-förvaret är att:

- 1) innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktiva ämnen.
- 2) upprätthålla underkriticitet

För att kapseln ska upprätthålla inneslutning den tid som krävs med hänsyn till det använda kärnbränslets radiotoxicitet ska den:

- 1) i tillräcklig grad motstå korrosionsangrepp
- 2) i tillräcklig grad motstå mekanisk belastning

Det är kapselns förmåga att upprätthålla inneslutning och motstå korrosionsangrepp och mekanisk belastning som styr dess utformning. Underkriticitet upprätthålls genom att valet av bränsleelement för inkapsling görs utifrån acceptanskriterier baserade på en kriticitetsanalys.

Nu gällande kravställda egenskaper och konstruktionsförutsättningar för kapseln, vilka relaterar till säkerheten efter förslutning, finns angivna i produktionsrapporten för kapseln (SKB 2010a, tabell 2-1). Konstruktionsförutsättningar och de krav som följer av dessa ska visas vara uppfyllda då kapseln slutligt deponeras i KBS-3-förvaret. De har med stöd av säkerhetsanalysen fastlagts med tillräcklig marginal för att medge att kapseln upprätthåller sina funktioner den tid som krävs för att KBS-3-förvaret ska kunna upprätthålla strålsäkerhet och uppfylla SSM:s doskriterium.

3.2 Planerad revision av konstruktionsförutsättningar som påverkar kapseln

Resultat och slutsatser från säkerhetsanalysen SR-Site gör att SKB planerar en revision av vissa konstruktionsförutsättningar som påverkar kapseln inför redovisningen av PSAR. Även resultat från det pågående konstruktionsarbetet avseende möjligheten att enkelt verifiera gällande konstruktionsförutsättningar är skäl för sådan revision. Syftet är att anpassa konstruktionsförutsättningarna till resultaten från säkerhetsanalysen och att ange dem på ett sätt som är direkt anpassat till konstruktion och utveckling.

De revisioner som planeras är relaterade till den högsta uppskattade islasten på slutförvaret (SKBdoc 1395038), bedömning av sannolikheten för skjuvning av deponeringshål och en uppdatering av buffertens funktioner och motsvarande konstruktionsförutsättningar och utformning. Dessa förändringar påverkar den isostatiska lasten och skjuvlasten på kapseln. Nedan beskrivs grunden för dessa revideringar samt konsekvenserna för kapseln i form av planerade uppdaterade konstruktionsförutsättningar (mekaniska laster).

3.2.1 Buffertens svälltryck och skjuvhållfasthet

Buffertens egenskaper påverkar både den isostatiska last och den skjuvlast som kapseln utsätts för. En viktig egenskap för den långsiktiga funktionen hos bufferten är att den efter vattenmättnad utvecklar ett svälltryck. Det finns en tydlig relation mellan svälltryck och (torr) densitet. Detta samband använde SKB för att specificera det densitetsintervall som utgjorde konstruktionsförutsättningar för bufferten inför säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2009). Svälltrycket är också beroende av materialsammansättningen hos bentonitmaterialiet. SKB har använt en direkt relation mellan svälltrycket och den mineralogiska sammansättningen i form av montmorillonithalt i bentoniten. Baserat på de resultat som presenteras i Karnland et al. (2006) sågs detta som ett rimligt antagande för de aktuella bentonitmaterialen (till exempel MX-80 och Deponit-Can). Detta var grunden för den specifikation av intervallet för innehållet av montmorillonit i bufferten som angavs i konstruktionsförutsättningarna för SR-Site (SKB 2009).

SKB avser nu att använda buffertens svälltryck i stället för densitet och montmorillonithalt som konstruktionsförutsättning. Detta innebär att massan bentonit som installeras i ett deponeringshål ska resultera i ett svälltryck inom ett acceptabelt intervall. Ett första förslag på intervall för svälltrycket är 3 till 10 MPa.

Det främsta skälet till bytet från densitet till svälltryck är att svälltrycket direkt kopplar till buffertens funktion och därmed blir kravet oberoende av vilken specifik bentonitsort som används. Angivandet av 10 MPa som högsta gräns innebär dessutom att belastningen på kapseln kommer att minska något jämfört med den gräns som användes i SR-Site (SKB 2009).

Svälltrycket i den installerade bufferten kan inte mätas utan buffertens utformning måste specificeras genom mätbara designparametrar. Installerad massa (kg) buffert i ett deponeringshål är praktisk att använda i detta sammanhang. Den installerade massan tillsammans med vatteninnehållet och deponeringshållets dimensioner ger medelvärdet av den installerade torrdensiteten hos bufferten vilken relaterar till ett svälltryck efter vattenmättnad för vald materialkvalitet. Buffertens svälltryck i ett deponeringshål beror inte enbart av mängden bentonit och dess egenskaper utan också av dimensionerna på deponeringshålen. Detta innebär att krav behöver ställas på deponeringshålens geometri och provning eller inmätning av dessa.

Utgångspunkten för utformningen av bufferten blir den totala massan (kg) bentonit som deponeras i ett specifikt deponeringshål. Buffertdensiteten kommer att variera något inom ett deponeringshål.

Variationerna beror på

- varierande initial densitet i installerade buffertblock och pellets
- expansion av bufferten uppåt in i återfyllningen då den tar upp vatten
- ojämnheter i deponeringshållets väggar
- bergutfall från deponeringshållets väggar orsakad av till exempel spjälkning.

Ojämnheter i installerad densitet kommer till viss del att jämnas ut när bentoniten sväller. Bedömningen är dock att det kommer att finnas densitetsgradienter i bufferten även i ett långsiktigt perspektiv. Bedömningen av om den installerade och kontrollerade bufferten upprätthåller sina funktioner på lång sikt görs i säkerhetsanalysen.

De konstruktionsförutsättningar som angavs i ansökan och som användes i SR-Site gällde krav på montmorillonithalt samt, efter vattenmättnad, på densitet, svälltryck, skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet. Revideringen av konstruktionsförutsättningarna för bufferten innebär att dessa ersätts med krav på svälltryck (3-10 MPa), krav på högsta värde för skjuvhållfasthet (4 MPa), och krav på hydraulisk konduktivitet ($< 10^{-12}$ m/s), samtliga efter vattenmättnad och uppmätta enligt standardiserade laboratoriemetoder.

Revideringen innebär att sambandet mellan materialspecifik torrdensitet och svälltryck, skjuvhållfasthet samt hydraulisk konduktivitet måste bestämmas som en del av godkännande av ett material och för att fastställa acceptabelt intervall för installerad massa.

Kontroll av mängden installerad buffermaterial

De provtillverkningar av bentonitblock och pelletar som genomförts, och redovisats i produktionsrapporten för buffert (SKB 2010c) visar att block och pelletar kan framställas med hög homogenitet inom snäva marginaler. Mängden installerad buffertmaterial i ett enskilt deponeringshål bedöms därmed kunna verifieras relativt enkelt.

Inmätning av deponeringshål

SKB har sedan 1990-talet mätt deponeringshål med olika metoder. I samarbete med SKB har Posiva nyligen skannat ett antal deponeringshål i Onkalo med både laser- och fotogrammetribaserade metoder. Fullskaleskanningar av deponeringshål i Äspölaboratoriet har ännu inte utförts med modern teknik, det vill säga laser/lidar eller fotogrammetri, förutom den laserskanning av ett deponeringshål som utfördes 2007.

SKB och Posiva besitter idag tillsammans erforderliga kunskaper för att med befintlig och beprövad teknologi mäta och analysera deponeringshålets geometri för att påvisa kravuppfyllelse (SKB 2010e). Insatser krävs dock för att optimera mät- och analysprocessen vilket förutsätter ett visst utvecklingsarbete av såväl mjuk- som hårdvara. Huvudspåret för SKB är att anpassa det befintliga RoCS-systemet (rock characterisation system) men alternativa scanningstekniker kommer att utvärderas inom ramen för utvecklingsarbetet.

3.2.2 Revision av isostatisk last på kapseln

Den nu gällande konstruktionsförutsättningen avseende isostatisk belastning på kapseln anger att den ska tåla ett isostatiskt tryck om 45 MPa. I slutförvaret har isostatlasten en komponent från buffertens svälltryck och en komponent från grundvattentrycket. Den senare, hydrostatiska, komponenten blir som störst då förvaret är istäckt och isens tyngd bidrar till grundvattentrycket på förvarsdjup.

Som tidigare redovisats till SSM (SKBdoc 1395038) samt i SR-Site (SKB 2011, avsnitt 12.7.2) är det beräknade extra hydrostatiska tryck som orsakas av istjockleken över Forsmark i huvudscenariots glaciationscykel 26 MPa. Det maximala extra hydrostatiska tryck som kan förväntas under den en miljon år långa analysperioden var i SR-Site 30 MPa, pessimistiskt härlett från den största inlandsisen under de senaste två miljoner åren. Nya analyser har nu genomförts och SKB:s slutsatser redovisas i SKBdoc 1396769. I det dokumentet konstateras, baserat på osäkerhetsanalysen i den nya analysen (Colleoni et al. 2014), att den maximala förväntade istjockleken över Forsmark under de kommande en miljon åren är 3500 m. Detta är i linje med analysen i SR-Site, där den största istjockleken antogs vara 3400 m. En istjocklek på 3500 m ger maximalt upphov till ett hydrostatiskt tryck på 31 MPa. Vidare görs bedömningen att en istjocklek på knappt 3500 m över Forsmark är mycket osannolik under de kommande 100 000 åren, och eventuellt även för de kommande en miljon åren. Grundvattentrycket vid Forsmark är ungefär 4,5 MPa under isfria förhållanden enligt SR-Site (SKB 2011, avsnitt 12.7.5), medan det maximala svälltrycket från bentoniten var 15 MPa i SR-Site. Detta skulle vid Forsmark ge en maximal möjlig isostatisk last av 50,5 MPa på kapseln om det hydrostatiska trycket (31+4,5 MPa) och bentonitens maximala svälltryck (15 MPa) adderas. Enligt SR-Site (SKB 2011, avsnitt 12.7.3) blir dock det totala trycket något lägre än summan av buffertens svälltryck och det hydrostatiska trycket, det vill säga ungefär 47,7 MPa.

Inom ramen för SKB:s arbete med att revidera de gällande konstruktionsförutsättningarna för bufferten planeras att ändra dessa så att svälltrycket från bufferten ska vara högst 10 MPa, se avsnitt 3.2.1. Detta tillsammans med ovan beskriven islast och grundvattentryck ger en maximal isostatisk last på kapslar i Forsmark på 45,5 MPa ($4,5+31+10=45,5$ MPa) om det hydrostatiska trycket och svälltrycket adderas.

Den nu gällande konstruktionsförutsättningen avseende isostatisk belastning på kapseln avser ett isostatiskt tryck om 45 MPa. Detta tryck är marginellt lägre än de maximala trycken både enligt den islast som redovisades i SR-Site och den nu redovisade maximala isostatiska lasten i kombination med det planerade nya kravet på buffertens maximala svälltryck. Med tanke på de osäkerheter som finns i modelleringarna av istjocklek och i hur svälltryck och vattentryck ska adderas är det dessutom

önskvärt med en viss marginal. SKB avser därför att höja kravet på kapselns förmåga att motstå isostatisk belastning till att kapslarna när de deponeras ska motstå en isostatisk last av 50 MPa.

För att verifiera att nuvarande kapselkonstruktion klarar den planerade skärpningen av konstruktionsförutsättningen har nya utredningar genomförts, se avsnitt 5.2.

3.2.3 Skjuvbelastning på kapseln

Enligt nu gällande konstruktionsförutsättningar ska deponerade kapslars kopparkorrosionsbarriär vara intakt efter en 5 cm skjuvrörelse med en hastighet på 1 m/s för buffertmaterialegenskaper hos en Ca-bentonit med en densitet på 2 050 kg/m³, för alla positioner och vinklar hos skjuvsprickan i deponeringshållet och för temperaturer ner till 0 °C. Insatserna ska efter skjuvningen ha kvar sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatisk last.

Den planerade förändringen av kravet på bentonitens maximala svälltryck och skjuvhållfasthet, se avsnitt 3.2.1, innebär att den skjuvbelastning som deponerade kapslar utsätts för kommer att mildras. Ett maximalt svälltryck om 10 MPa och en maximal skjuvhållfasthet ≤ 4 MPa innebär att bentoniten kommer att vara mindre styv och därmed inte överföra lika mycket last som blir fallet med den nu gällande konstruktionsförutsättningen.

En bergskjuvning av 5 cm innebär en avsevärd belastning på kapseln, vilket i sin tur innebär att detta lastfall är styrande för ett flertal mekaniska egenskaper hos kapseln. Risken för en sådan skjuvning är dock mycket liten. Enligt utvärdering av risken för skjuvning som presenteras i SR-Site (SKB 2011 avsnitt 10.4.5 och 12.8) kommer i genomsnitt färre än ett deponeringshål att utsättas för skjuvrörelser som är större än 5 cm under en miljon år.

Analyserna av skjuvning som följd av jordskalv har fortsatt efter SR-Site men är ännu inte helt färdiga. En bedömning kan göras att den redan mycket låga sannolikheten för skjuvning större än 5 cm har överskattats i SR-Site. Även frågan huruvida det skulle vara möjligt att uppskatta sannolikheten för lägre skjuvbelopp har ställts, men det bedöms svårt att göra på ett rimligt sätt, givet de osäkerheter som fortfarande råder kring förståelsen för bergrörelser i samband med jordskalv, speciellt rörande spänningsfall, tektonisk töjningshastighet, effekter av hypocentrats lokalisering och effekter av heterogena zonegenskaper. En ändring av konstruktionsförutsättningen vad avser den skjuvrörelse kapseln ska motstå till väsentligt lägre belopp än 5 cm förefaller därför idag inte möjligt, även om det inte kan uteslutas att en mindre förändring skulle vara möjlig.

SKB behåller därför tills vidare den gällande konstruktionsförutsättningen avseende skjuvrörelsens storlek, 5 cm, och hastighet 1 m/s, medan formuleringen av buffertens egenskaper vid skjuvbelastning kommer att uppdateras i enlighet med de nya konstruktionsförutsättningarna för bufferten, se avsnitt 3.2.1.

4 Kapselns referensutformning

SKB har redovisat en referensutformning för kapseln i ansökan (SKB 2010a). Referensutformningen beskriver en utformning som är giltig från en definierad tidpunkt till dess annat beslutats och SKB använder den som förutsättning för teknikutveckling, projektering och analyser av säkerhet, strålskydd och miljöpåverkan. Baserat på det utvecklingsarbetet som SKB bedriver kommer kapselns referensutformning att revideras som underlag till PSAR.

Referensutformningen omfattar de direkt eller indirekt provbara designparametrar som specificerar de egenskaper, till exempel dimensioner, materialegenskaper och materialsammansättning, som bidrar till säkerhet och strålskydd och deras acceptabla värden. Utveckling och fastställande av referensutformning stöds av

- analyser av mekanisk hållfasthet, korrosionsbeständighet, kriticitet etc
- experiment och tester

- erfarenheter och information från provtillverkning och svetsning samt genomförd provning etc.

Referensutformningen utgör ett underlag för de krav som behöver ställas på produktionssystemet för kapslar, se avsnitt 6. Den är också utgångspunkt för det fortsatta arbetet med att specificera parametrar som ska styras, provas och kontrolleras i produktionen.

Kapselinsatsens och kopparhöljets nuvarande referensutformning är baserad på ansökansunderlaget (SKB 2010a) och kompletteringar inom tillståndsärendet och presenteras i avsnitt 4.1 och 4.2. De förändringar som angivits i kompletteringar inlämnade till SSM är markerade med **fetstil** i tabellerna nedan. Beslut om förändringar i referensutformningen kommer att fattas inför PSAR och redovisas i denna.

4.1 Insatsens referensutformning

4.1.1 Materialsammansättning

Specifikation av BWR- och PWR-insatsens materialsammansättning redovisas i Tabell 4-1.

Tabell 4-1. Specifikation av materialsammansättning för referensutformningen av BWR- och PWR-insatsen.

Designparameter	Acceptabelt värde	Motivering	Referenser
Järn (Fe)	> 90 vikt%	Parameter för att förhindra kriticitet	SKB (2010a)
Kol (C)	< 6 vikt%	Parameter för att förhindra kriticitet	SKB (2010a)
Kisel (Si)	< 4 vikt%	Parameter för att förhindra kriticitet	SKB (2010a)
Koppar (Cu)	< 0,05 vikt%	Parameter för att förhindra försprödning av segjärnet	SKB (2010a)

4.1.2 Materialegenskaper

Specifikation av BWR- respektive PWR-insatsens materialegenskaper redovisas i Tabell 4-2.

Tabell 4-2. Specifikation av materialegenskaperna (segjärn) för referensutformningen av BWR- respektive PWR-insatsen.

Designparameter	Acceptabelt värde	Motivering	Referenser
Brottseghet vid initiering av spricktillväxt K_{IC} vid 0 °C–20 °C	Minimum BWR 4,1 MPam ^{0,5} Minimum PWR 4,1 MPam ^{0,5}	Isostatlastfallet	SKBdoc 1288292
Brottseghet vid initiering av spricktillväxt J_{IC} vid 0 °C–20 °C	Minimum BWR 33 kN/m Minimum PWR 27 kN/m	Skjuvlastfallet	SKB 2010a, Raiko et al. 2010 SKBdoc 1288292
Brottseghet vid 2 mm stabil spricktillväxt J_{2mm} vid 0 °C–20 °C	Minimum BWR 88 kN/m Minimum PWR 78 kN/m	Skjuvlastfallet	SKB 2010a, Raiko et al. 2010 SKBdoc 1288292
Sträckgräns i drag, sann spänning vid 20 °C	Minimum BWR 240 MPa Minimum PWR 240 MPa	Skjuvlastfallet	SKBdoc 1288292
Sträckgräns i tryck, sann spänning vid 20 °C	Minimum BWR 240 MPa Minimum PWR 240 MPa	Isostatlastfallet	SKBdoc 1288292
Brottförlängning A_5 vid 0°C–20 °C, linjär normaltöjning	> 6,3 %	Skjuvlastfallet	SKBdoc 1288292

4.1.3 Dimensioner

Specifikation av BWR- respektive PWR- insatsens dimensioner redovisas i Tabell 4-3 och Tabell 4-4.

Tabell 4-3. Specifikation av dimensioner för BWR- insatsen (SKB 2010a). Toleranser ges inom parentes.

Designparameter	Acceptabelt värde (mm)
Längd	4 573 (+0/-0,5)
Diameter	949 (+0,5/-0)
Tjocklek bottenplatta av segjärn	60 (+10,1/-5,6)
Invändig längd	4 463 (+5/-10)
Tvärsnitt kanalrör (innan gjutning)	160 x 160 (±3,8)
Utvändig hörnradie kanalrör	20 (±5)
Avstånd mellan kanalrör (innan gjutning)	30 (+2,7/-4,6)
Vägg tjocklek kanalrör	10 (±1)
Utvändigt mått kanalrör	180 (±1,8)
Kantavstånd	33,3 (±10)

Tabell 4-4. Specifikation av dimensioner för PWR- insatsen (SKB 2010a). Toleranser ges inom parentes.

Designparameter	Acceptabelt värde (mm)
Längd	4 573 (+0/-0,5)
Diameter	949 (+0,5/-0)
Tjocklek bottenplatta av segjärn	80 (+10,1/-5,6)
Invändig längd	4 433 (+5/-10)
Tvärsnitt kanalrör (innan gjutning)	235 x 235 (±5,1)
Utvändig hörnradie kanalrör	20 (±5)
Avstånd mellan kanalrör (innan gjutning)	110 (±6,2)
Vägg tjocklek kanalrör	12,5 (±1,25)
Utvändigt mått kanalrör	260 (±2,6)
Kantavstånd	37,3 (±10)

4.1.4 Stållock till BWR- och PWR insatsen

Stållocket är utformat av standardstål, EN 10025 S355J2G3 (t=40-63 mm) och det svarar för en lastbärande funktion i toppen på insatsen. Ett certifikat utfärdas av leverantören för att verifiera att stållocket uppfyller standarden för materialet, se Tabell 4-5 (Raiko et al. 2010). I Tabell 4-6 specificeras de materialegenskaper och dimensioner för stållocket till BWR- och PWR insatsen (SKB 2010a).

Tabell 4-5. Specifikation av materialegenskaper hos stållocket till BWR- och PWR-insatsen.

Designparameter	Standard (EN 10025)	Referenser
Sträckgräns (MPa)	≥335	SKB 2010a, Raiko et al. 2010
Brottgräns (MPa)	490-630	Raiko et al. 2010
Brottförlängning (%)	19	Raiko et al. 2010
Elasticitetsmodul (GPa)	210	Raiko et al. 2010
Poissons tal (--)	0,3	Raiko et al. 2010

Tabell 4-6. Specifikation av dimensioner för stållocket till BWR- och PWR-insatsen (SKB 2010a). Toleranser ges inom parentes.

Designparameter	Acceptabelt värde (mm)
Diameter	910 (h7)
Tjocklek	50 ($\pm 0,1$)
Fasningsvinkel	5° ($\pm 0,1^\circ$)

4.2 Referensutformning för kopparhöljet

4.2.1 Materialsammansättning

Specifikation av kopparhöljets materialsammansättning anges i Tabell 4-7.

Tabell 4-7. Specifikation av materialsammansättning för kopparhöljet.

Designparameter	Acceptabelt värde	Motivering	Referenser
Koppar (Cu)	$\geq 99,99 \%$	Kopparhöljet ¹⁾ måste vara av högren koppar för att undvika korrosion i korngränserna.	SKB 2010a
Fosfor (P)	30-100 ppm	för att erhålla god krypduktilitet.	SKB 2010a
Svavel (S)	<12 ppm	för att erhålla god krypduktilitet.	SKB 2010a
Väte (H)	<0,6 ppm	för att undvika försprödning under tillverkningsprocessen.	SKB 2010a
Syre (O)	< några tiotals ppm	för att undvika korrosion i korngränserna.	SKB 2010a, SKB 2009

1) Prover från tillverkade kopparkomponenter har benämnts "kapselkoppar 99,95%" i redovisning till SSM om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten.

4.2.2 Materialegenskaper

Specifikation av kopparhöljets mekaniska egenskaper anges i Tabell 4-8.

Tabell 4-8. Specifikation av de mekaniska egenskaperna hos kopparhöljet.

Designparameter	Acceptabelt värde	Motivering	Referenser
Brottförlängning	>40 %	enaxlig dragprovning rumstemperatur, för att motstå mekanisk last i slutförvaret	SKB 2010a
Brottförlängning	>15 %	krypprovning vid 0-125 °C, för att motstå mekanisk last i slutförvaret	SKB 2010a
Brottkontraktion	>80 %	enaxlig dragprovning och krypprovning, för att motstå mekanisk last i slutförvaret	Raiko et al. 2010
Medelkornstorlek	< 800 μm	maximal verifierad medelkornstorlek som ger tillfredsställande krypduktilitet.	SKB 2010a

4.2.3 Dimensioner

Specifikation av kapselns dimensioner efter förslutning av den anges i Tabell 4-9.

Tabell 4-9. Specifikation av nominella dimensioner och toleranser på kopparkapseln efter förslutning (SKB 2010a).

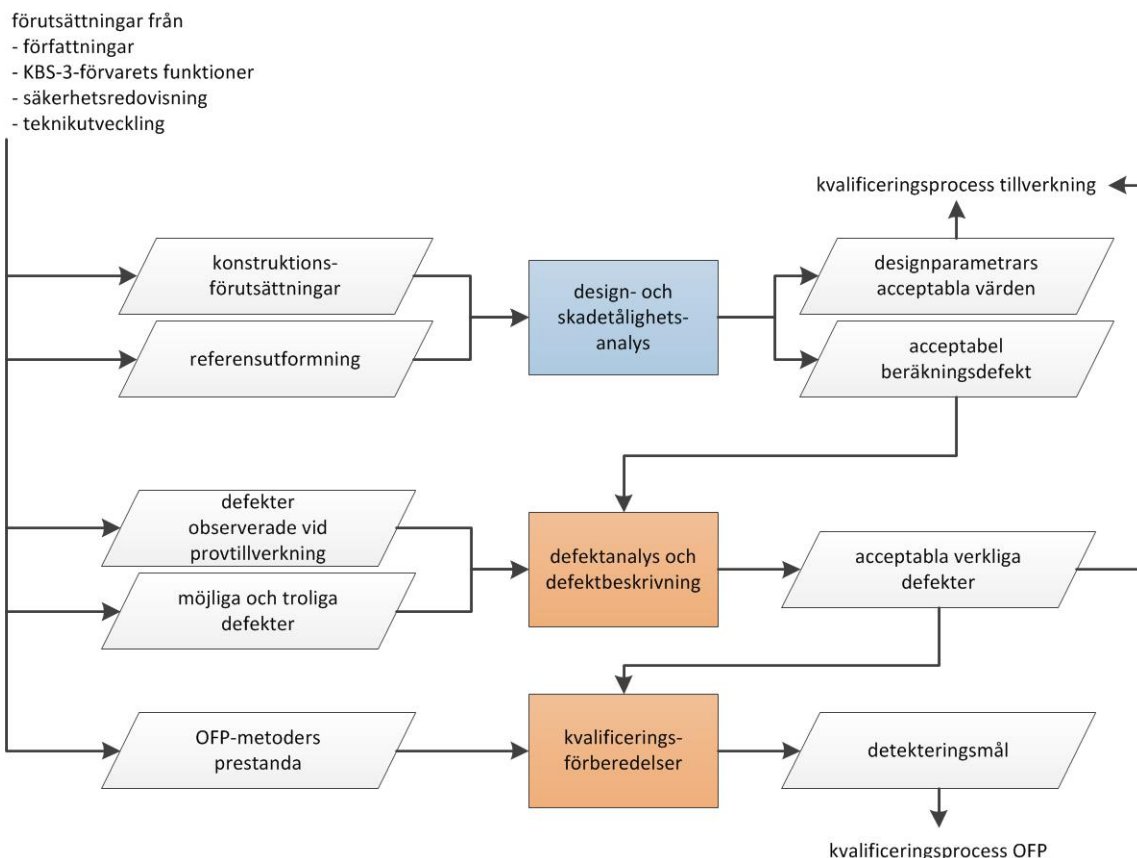
Designparameter	Acceptabelt värde (mm)
Vägg tjocklek i höljet (rör)	49 ($\pm 0,3$)
Vägg tjocklek i höljets svetsar	48,5 ($\pm 0,7$)
Total längd hölje	4 835 (+3,25/-2,75)
Yttre diameter kopparhölje	1 050 ($\pm 1,2$)
Utvändig inre diameter lock och botten	850 ($\pm 0,8$)
Utvändig inre diameter lock	821 (+0/-0,5)
Utvändig radieövergång vid fas på lock och botten	10
Invändig inre diameter kopparlock	953 d8
Invändig inre diameter kopparrör	953 H8
Tjocklek lock	50 ($\pm 0,6$)
Tjocklek botten	50 (± 1)
Invändig längd	4 575 (+0,6/-0,1)
Invändigt axiellt spel mellan stållock och kopparlock	2 (+1,1/-0,3)
Radiellt spel mellan insats och kopparhölje	1,5 (+0,25/-0,5)

5 Analys av referenskapseln

Kapseln ska uppfylla konstruktionsförutsättningarna då den slutligt deponeras i KBS-3-förvaret. Innan produktionen av kapslar kan inledas ska det verifieras att kapslarna i sin referensutformning och med hänsyn till de defekter som kan uppstå under produktion och hantering uppfyller ställda krav. Detta görs inom ramarna för en uppsättning analyser av utformning och defekter.

5.1 Analyser av kapselns referensutformning och acceptabla defekter

För att verifiera, och vid behov justera, de krav som ska ställs på acceptabla värden för de designparametrar som specificeras i referensutformningen och vilka defekter som kan tillåtas i kapselns olika delar görs analyser av kapselns referensutformning och defekter. Referensutformningen och analysernas resultat utgör grunden för att bestämma de krav som ska uppfyllas vid tillverkning samt defekter som ska kunna detekteras vid oförstörande provning (OFP). En översikt av analyserna, resultaten och förutsättningarna för dessa samt relationen till kvalificeringen av tillverkning och OFP ges i Figur 5-1.



Figur 5-1. Översikt över analyser av utformning och defekter.

Design- och skadetålighetsanalyser utförs för de mekaniska belastningarna. De utgår från de lastfall som beskrivs av konstruktionsförutsättningarna och från kapselns referensutformning. Referensutformningens förmåga att motstå belastningar analyseras. I skadetålighetsanalyser postuleras sedan en uppsättning beräkningsdefekter som beskrivs till sin typ, till exempel volymetriska eller sprickliknande, samt med en väl definierad geometrisk form och utbredning. Defekterna ansätts i olika zoner som definieras med utgångspunkt från de spänningar och töjningar som uppstår i konstruktionen vid de analyserade belastningarna. Resultatet av analyserna är verifierade värden på designparametrarna och de beräkningsdefekter som kan accepteras för att kapseln ska motstå de mekaniska belastningarna. De acceptabla värdena på designparametrarna utgör grunden för att bestämma krav som ska uppfyllas vid tillverkning, medan de acceptabla beräkningsdefekterna är en av utgångspunkterna för att ta fram acceptanskriterier för oförstörande provning.

I *defektanalysen* görs i ett första steg en kartläggning av de defekter som kan förväntas förekomma baserat på observationer från provtillverkning och möjliga och troliga defekter beskrivna i litteratur eller standarder. Resultatet blir en defektbeskrivning som omfattar vilka sorters defekter, till exempel slag, porositet, smidesveck eller kaviteter, som kan förväntas förekomma och en beskrivning av dem med avseende på egenskaper som är betydelsefulla för potentiella OFP-metoder. Defektbeskrivningarna analyseras sedan mot de acceptabla beräkningsdefekterna för att bestämma acceptabla verkliga defekter. Inom ramarna för defektanalysen anges för varje sorts defekt och defekttyp de defektparametrar, till exempel utbredning i olika riktningar, med sina acceptabla värden som ska bestämmas vid OFP. Dessa utgör sedan underlag för kvalificeringar.

I produktionen måste de beskrivna acceptabla defekterna kunna bestämmas och visas överensstämmande med givna acceptabla värden på defektparametrarna. Det betyder att det måste finnas OFP-tekniker som har tillräcklig prestanda för att bestämma defektparametrarna med tillräcklig noggrannhet. Baserat på prestanda hos tillgängliga OFP-tekniker, de acceptabla defekterna och aktuella geometrier och material utreds, som en del av förberedelserna för kvalificering, hur stora defekter som måste kunna hittas för att man med säkerhet ska kunna visa att det inte förekommer några defekter som är

större än de acceptabla. Dessa minsta defekter som måste kunna hittas benämns detekteringsmål, i kvalificeringsprocessen används de för att bedöma OFP-teknikernas duglighet.

5.2 Mekanisk belastning – isostatiskt lastfall

Isostatiska lastfallet är huvudlastfallet för kapseln, detta lastfall kan förväntas påverka samtliga kapslar i förvaret. I tillståndsprövningen gäller konstruktionsförutsättningen att kapseln ska motstå en isostatisk last på 45 MPa (SKB 2010b). Denna last användes i ansökan vid de verifierande beräkningarna av kapselns mekaniska integritet för det isostatiska lastfallet, se Raiko et al. (2010).

Enligt avsnitt 3.2.2 planerar SKB en revision av denna konstruktionsförutsättning som innebär att kapseln ska motstå en isostatisk last på 50 MPa, vilket innebär att de verifierande beräkningarna behöver genomföras också för denna högre last. För att verifiera att den nuvarande kapselkonstruktionen klarar den planerade skärpningen av konstruktionsförutsättningen har en analys av den ökade isostatiska lasten utförts (SKBdoc 1454226). SKB:s bedömning av denna analys är att det finns marginaler för en ökad isostatisk belastning. Dock återstår det att genomföra en skadetålighetsanalys för 50 MPa isostatisk last, vilket planeras att göras till PSAR.

De verifierande beräkningarna av isostatlastfallet omfattar

- analys av insatsens hållfasthet,
- analys av stållocket, samt
- analys av kopparhöljet.

För var och en av dessa punkter redogörs i det följande kort för vilka analyser som genomfördes i ansökan samt vilka analyser som därefter tillkommit för lastfallet 45 MPa. För den första (och mest grundläggande) punkten visas också vilket arbete som genomförts för att verifiera att kapseln klara konstruktionsförutsättningen 50 MPa.

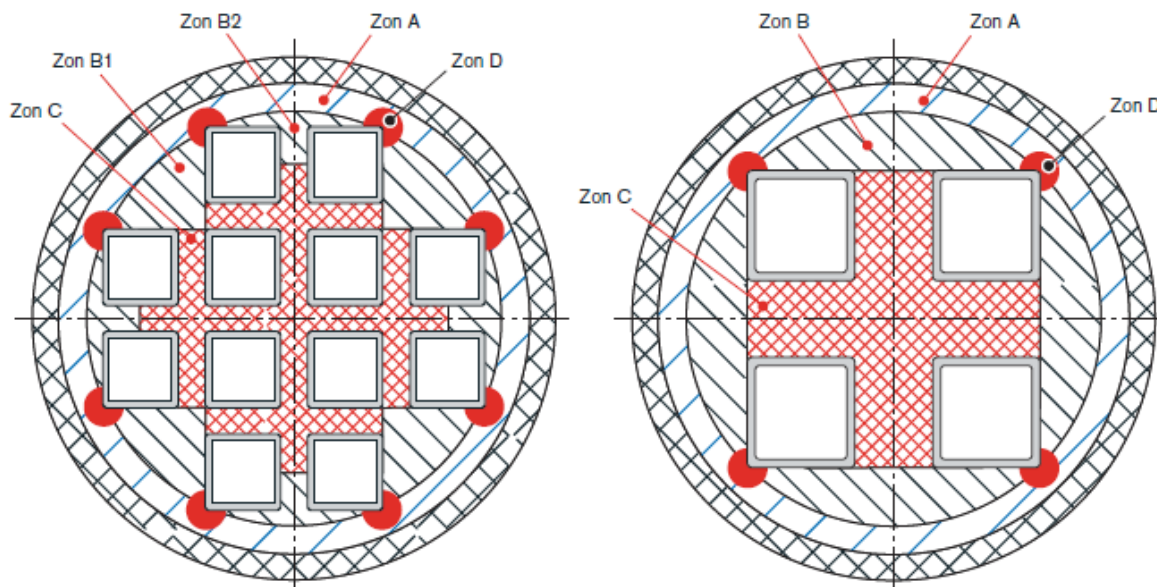
5.2.1 Analys av insatsens hållfasthet

Isostatisk last 45 MPa

En skadetålighetsanalys av det gränssättande isostatlastfallet (45 MPa) för BWR- och PWR- insatsen har genomförts och redovisas i Dillström et al. (2010) samt i SKBdoc 1288288. En sammanställning av de parametrar som har betydelse för utformningen av BWR- respektive PWR-insatsen finns i SKBdoc 1288292. Resultaten från analysen är acceptabla materialegenskaper för segjärnet, acceptabla idealiserade beräkningsdefekter (så kallade postulerade defekter) och acceptabelt kantavstånd (avstånd mellan insatsens mantelyta och kanalrör).

Resultat och slutsatser från denna analys avseende acceptabla värden på materialegenskaper som erhållits från analysen av insatsen (SKBdoc 1288292) används för att specificera referensutformning avseende materialegenskaper i insatsen, se Tabell 4-2. Specifikationen av acceptabel förskjutning i kantavståndet, så som det är specificerat i referensutformningen (maximalt 10 mm minskat kantavstånd) enligt Tabell 4-3 och Tabell 4-4, har också verifierats (SKBdoc 1288292).

Analysen visar att de defekttyper som är signifikanta för det isostatiska lastfallet är volymetriska defekter och axiella sprickor. Acceptabel storlek för dessa idealiserade beräkningsdefekter har därefter använts för att ange tillåtna storlekar på fysikaliska defekter som kan uppstå vid tillverkningen (Dillström et al. 2010). De enligt beräkningarna acceptabla storlekarna för postulerade defekter redovisas i Tabell 5-1 till Tabell 5-4. De acceptabla defektstorlekarna är angivna för olika zoner i insatsen enligt Figur 5-2. SKB planerar vidare utredningar av olika tillverkningsdefekters mekanik. Bland annat behövs ytterligare utredning om vilka tillverkningsdefekter som ska betraktas som volymetriska respektive sprickliknande beräkningsdefekter.



Figur 5-2. Zonindelning enligt Raiko et al. (2010, figur 6-1).

Tabell 5-1. Acceptanskriterier för volymetriska beräkningsdefekter, BWR insatser (Dillström et al. 2010)

(Zonindelning enligt Figur 5-2).

Acceptanskriterier diameter (mm)				
A	B1	B2	C	D
40	60	20	20	20

Tabell 5-2. Acceptanskriterier för volymetriska beräkningsdefekter, PWR insatser (Dillström et al. 2010).

(Zonindelning enligt Figur 5-2).

Acceptanskriterier diameter (mm)			
A	B	C	D
80	100	100	20

Tabell 5-3. Acceptanskriterier för sprickliknande beräkningsdefekter i axiell led, BWR insatser (Dillström et al. 2010).

(Zonindelning enligt Figur 5-2).

Defekt	Riktning	Acceptanskriterier halvelliptisk form djup/längd mm ¹⁾					
		A 0-2 mm från ytan	A >2 mm från ytan	B1	B2	C	D
Sprickliknande defekt	Axiell	37	37	65	50	24	32
		222	222	393	300	144	196

1) Djup/längd = 1/6

Tabell 5-4. Acceptanskriterier för sprickliknande beräkningsdefekter i axiell led, PWR insatser (Dillström et al. 2010).

(Zonindelning enligt Figur 5-2).

Defekt	Riktning	Acceptanskriterier halvelliptisk form djup/längd (mm) ¹⁾				
		A 0-2 mm från ytan	A >2 mm från ytan	B	C	D
Sprickliknande defekt	Axiell	53	53	112	104	31
		318	318	672	624	186

1) Djup/längd = 1/6

Resultatet i Dillström et al. (2010) samt i SKBdoc 1288288 visar att BWR- och PWR-insatserna är mycket tåliga med avseende på yttre övertryck och att stora defekter kan tolereras.

Lastfall som baseras på att kapseln utsätts för ojämnt svälltryck i deponeringshål i Kärnbränsleförvaret har också analyserats. Dessa lastfall är inte dimensionerande, se Raiko et al. (2010) samt SKBdoc 1371849.

Isostatisk last 50 MPa

För att verifiera att nuvarande kapselkonstruktion klarar den planerade skärningen av konstruktionsförutsättningen har nya utredningar genomförts. SKB har låtit genomföra förnyade beräkningar av det isostatiska lastfallet för att värdera hur den ökade isostatiska lasten påverkar kapseln (SKBdoc 1454226). I dessa analyser har den detaljerade geometrin inklusive stagplåtar mellan kanalrören använts i tredimensionella FE-beräkningar.

Trycklasterna är de helt dominerande belastningarna och kapseln behöver motstå dessa och bibehålla den mekaniska integriteten. Analyserna (SKBdoc 1454226) visar på god överensstämmelse med de påkänningar och slutsatser som presenterats i Dillström et al. (2010) för BWR- och PWR-insatsen för nominell geometri utan defekter. För fallet med hålrumdefekter visar de nya analyserna betydligt mindre påkänningar jämfört med analyserna som presenteras av Dillström et al. (2010). Det beror sannolikt på att härledningen av tillåtna defekter gjordes med en tvådimensionell FE-modell av Dillström et al. (2010) där de postulerade håldefekterna blev cylindriska med en höjd motsvarande hela insatsens. Detta var ett mycket pessimistiskt antagande. De nya analyserna visar också att stålassetten i hög grad bidrar till insatsens förmåga att motstå den isostatiska lasten. Med hänsyn till den nya informationen bedömer SKB att det är möjligt att fastställa konstruktionsförutsättningen att kapseln ska kunna motstå 50 MPa isostatisk last. Det återstår dock att göra en mera fullständig genomgång av tillåtna defekter.

5.2.2 Analys av stållocket

Analyser av stållockets bärlighet med avseende på det isostatiska lastfallet (45 MPa) för BWR- respektive PWR-insatsen har genomförts (SKBdoc 1177857). Analysen visar att stållockets strukturella integritet bibehålls för både BWR- och PWR-utförandet av kapslarna.

Stållockets utformning uppfyller kraven mot plastisk kollaps enligt ASME III för den specificerade isostatiska lasten 45 MPa för såväl BWR- som PWR-insatserna. Stållockets kollapslast ligger markant över den globala kollapslasten för kapslarna som helhet.

De acceptabla defektstorlekar som ska gälla för stållocket kan bestämmas enligt ASME Section XI, IWB-3500 för de externa laster som definieras i konstruktionsförutsättningarna, enligt det förfarande som anges i SKBdoc 1451358.

5.2.3 Analys av kopparhöljet

Kopparkapseln har verifierats med avseende på krypning i kopparhöljet. I Raiko et al. (2010) anges att maximalt 13 % plastisk töjning uppstår i svetsroten på kopparhöljet under 100 000 år då kapseln belastas med 45 MPa isostatiskt övertryck. Därtill har krypning i kopparhöljet utretts i SKBdoc 1399768 med isostatlast upp till 60 MPa. Kapseln har även analyserats med fokus på elasto-plastisk

deformation i svetsroten mellan rör och lock av Jin och Sandström (2013) som dock endast analyserar isostatlast upp till 15 MPa (skedet fram till glaciation).

De största beräknade plastiska töjningarna som redovisas i Jin och Sandström (2013) uppgår till 38 % och det är av samma storleksordning som erhållits vid belastning med 45 MPa (SKBdoc 1399768) där det element med högst påkänning i motsvarande område uppvisar 35 % plastisk töjning.

Acceptabel plastisk deformation i kopparhöljet är maximalt 80 % sann töjning enligt Raiko et al. (2010, s 19) varför SKB gör bedömningen att den isostatiska lasten inte hotar kapselns integritet. Kravet att deformationen i kopparhöljet får uppgå till maximalt 80 % sann töjning har härletts med utgångspunkt av brottkontraktionen som uppstår på en dragprovstav vid krypprovning eller konventionell elasto-plastisk dragprovning. Areakontraktionen på staven måste vara minst 80 %, vilket motsvarar cirka 160 % effektivtöjning i den kraftigt deformerade midjan på provstaven vilket betyder att kravet på maximalt 80 % sann töjning i kopparhöljet är pessimistiskt.

5.3 Mekanisk belastning – skjuvlast

Skjuvlastfallet är ett exceptionellt lastfall även om en mycket lång tidsperiod beaktas. Enligt utvärderingen av risken för skjuvning som presenteras i SR-Site (SKB 2011, avsnitt 10.4.5 och 12.8) kommer i genomsnitt färre än ett deponeringshål att utsättas för skjuvrörelser som är större än 5 cm under en miljon år. Vidare är skjuvlastfallet ett förskjutningsstyrt lastfall vilket enligt ASME betraktas som ett sekundärt lastfall, se Raiko et al. (2010). Insatsmaterialens skjuvegenskaper har utretts liksom skjuvlastinducerade påkänningar i stålloket (SKBdoc 1415152) och deformationer i kopparhöljet (SKBdoc 1403930, 1339902). Eftersom skjuvlastfallet är kortvarigt är krypning i kopparhöljet inte meningsfullt att analysera för de korta belastningstiderna, istället har elasto-plastisk analys utförts för kopparhöljet. En känslighetsanalys av kopparhöljets integritet vid skjuvning har även utförts då insatsen inuti kapseln initialt förutsätts vara brusten (SKBdoc 1404369).

Analysen av skjuvlastfallet omfattar

- skadetålighetsanalys av insatsen
- verifierande analys av stålloket
- beräkning av elasto-plastisk deformation för kopparhöljet.

För var och en av dessa punkter redogörs i det följande kort för vilka analyser som genomfördes i ansökan samt vilka analyser som därefter tillkommit.

5.3.1 Skadetålighetsanalys av insatsen

Skjuvlastfallet har analyserats med avseende på skadetålighetsanalyser för BWR- och PWR-insatsen och med bentonitegenskaper som motsvarar densiteten 2 050 kg/m³, skjuvhastighet 1 m/s, skjuvmagnitud 5 cm samt vinkelrätt skjuvplan mot kapseln som träffar kapseln vid ¾ av kapselns längd från dess botten. Som framgår av avsnitt 3.2.1 överväger SKB att något mildra detta krav genom att sänka bentonitens högsta skjuvhållfasthet. Därvid planeras nya skadetålighetsanalyser, se avsnitt 5.7.

Skadetålighetsanalys för BWR-insatsen med avseende på skjuvlastfallet genomfördes av Dillström och Bolinder (2010) vilken redovisades i produktionsrapporten (SKB 2010b). För PWR har motsvarande analyser genomförts och redovisats i ”Analysis of PWR canister inserts using data acquired from PWR material” (SKBdoc 1288288). En värdering av volymetriska defekter vid skjuvlastfallet har gjorts i ”Modelling and analysis of canister with insert void defects for earthquake induced rock shear” (SKBdoc 1427299). De beräkningsdefekter som bedömts signifikanta för skjuvlastfallet är sprickor med huvudsaklig utbredning i omkretsled. Därför har skadetålighetsanalysen gjorts med sprickliknande beräkningsdefekter. De acceptabla defektstorlekarna redovisas i Tabell 5-5 och Tabell 5-6. För de defekter där tecknet ”större än, >” före värdet finns angivet i tabell 5-5 och tabell 5-6 innebär det att beräkningar inte är gjorda för större defekter men att fortsatta utredningar kan leda till större acceptabla defekter i vissa fall.

Tabell 5-5. Acceptanskriterier för sprickliknande beräkningsdefekter i omkretsled, BWR-insatser. (Zonindelning enligt Figur 5-2)

Defekt	Riktning	Acceptanskriterier elliptisk form djup/längd (mm) ¹⁾					
		A 0-2 mm från ytan	A >2 mm från ytan	B1	B2	C	D
Sprickliknande	Omkretsled	4,5 ²⁾	>10	>10	>10	>10	>10
		27	>60	>60	>60	>60	>60
		Acceptanskriterier cirkelformad defekt djup/längd (mm)					
		8,2 ³⁾	>10	>10	>10	>10	>10
		16,4	>10	>10	>10	>10	>10

1) Djup/längd = 1/6

2) Halvelliptisk ytdefekt, djup/längd = 1/6

3) Halvcirkulär ytdefekt

Tabell 5-6. Acceptanskriterier för sprickliknande beräkningsdefekter i omkretsled, PWR-insatser. (Zonindelning enligt Figur 5-2)

Defekt	Riktning	Acceptanskriterier elliptisk form djup/längd (mm) ¹⁾				
		A 0-2 mm från ytan	A >2 mm från ytan	B	C	D
Sprickliknande	Omkretsled	4,1 ²⁾	>10	>10	Beräkningar saknas	>10
		24,6	>60	>60	Beräkningar saknas	>60
		Acceptanskriterier cirkelformad defekt djup/längd (mm)				
		7,5 ³⁾	>10	>10 ⁴⁾	Beräkningar saknas	>10
		15	>10	>10 ⁴⁾	Beräkningar saknas	>10

1) Djup/längd = 1/6

2) Halvelliptisk ytdefekt, djup/längd = 1/6

3) Halvcirkulär ytdefekt

4) I den inre delen i denna zon är den acceptabla storleken >20 mm.

De materialegenskaper som är signifikanta för skjuvlastfallet är brottseghet vid initiering av spricktillväxt (J_{Ic}), brottseghet vid 2 mm stabil spricktillväxt (J_{2mm}) samt krav på plastisk töjning i segjärnet. En sammanställning ges i SKBdoc 1288292 och presenteras i tabell 4-3.

Referensutförningen med kantavstånd minskat med maximalt 10 mm i BWR- och PWR-insatserna enligt Tabell 4-3 och Tabell 4-4 har också verifierats med avseende på skjuvlasten för BWR-insatsen (SKBdoc 1450913), för PWR-insatsen (SKBdoc 1459222) samt värderats enligt SKBdoc 1450913 respektive SKBdoc 1459222 med avseende på inverkan på skadetåligheten. Det har visat sig att 10 mm minskat kantavstånd inte påverkar de acceptabla defektstorlekarna för insatserna.

5.3.2 Analys av stållocket

Analyser av stållockets bärlighet med avseende på skjuvlastfallet har utförts (SKBdoc 1415152). Påkänningarna på stållocket är låga och den mekaniska responsen hotar inte kapselns integritet även för ett skjuvplan som träffar kapseln ogynnsamt i överkanten på stållocket.

5.3.3 Beräkning av elasto-plastisk deformation för kopparhöljet

Som framgår i Raiko et al. (2010) är skjuvlastfallet endast mycket kortvarigt till sin natur varför kopparhöljet får analyseras med avseende på elasto-plastisk deformation. Skjuvplan som träffar kapseln nära toppen och botten på kapseln har undersökts (SKBdoc 1403930). Skjuvning av en kapsel med brusten insats har analyserats i SKBdoc 1404369. Skjuvplan som träffar kapseln på olika axiella positioner, mitt på kapseln det vill säga 50 %, 75 % samt 90 % sett från kapselns botten har analyserats i SKBdoc 1339902. Resultatet visar att det skjuvlastfall som ger högst plastisk töjning i kopparhöljet är då skjuvplanet träffar kopparkapseln vinkelrätt vid position 90 % av kapselns längd

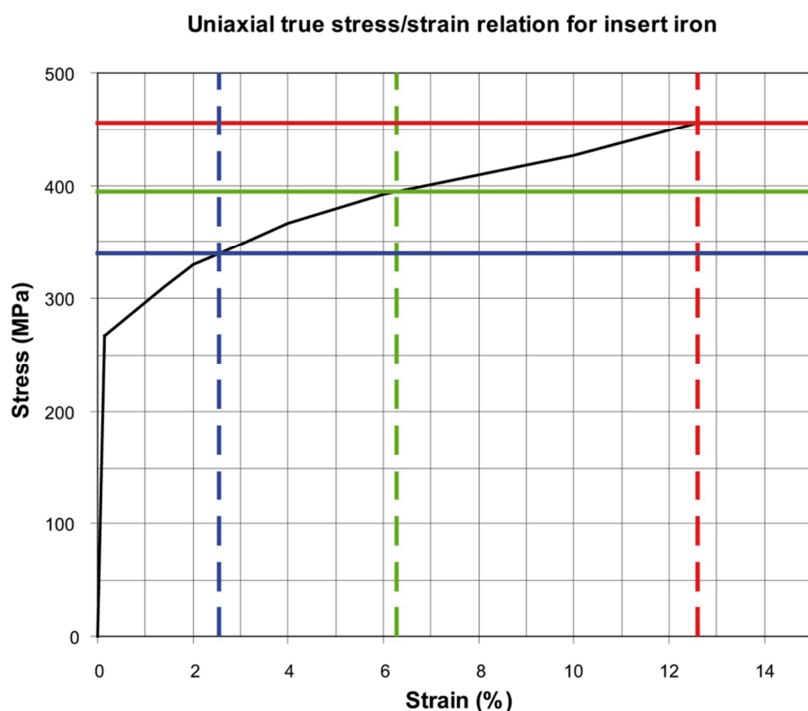
räknat från kapselns botten för olika bentonitdensiteter och sträckgränser samt brottgränser för insatsen.

För 5 cm skjuvrörelse uppstår då cirka 33 % plastisk töjning i kopparhöljets topp för bentonitdensiteten 2 050 kg/m³. Eftersom acceptabel plastisk deformation i kopparhöljet är maximalt 80 % sann plastisk töjning enligt Raiko et al. (2010) gör SKB även i detta fall bedömningen att kapselns mekaniska integritet inte hotas.

5.4 Mekanisk belastning - kombinationen av isostatisk last och skjuvlast

Kombinationen av en isostatisk last på 45 MPa och en skjuvrörelse på 5 cm är ett lastfall som inte är dimensionerande eftersom en hög isostatisk last stabiliserar bergrunden runt förvaret och en samtidig skjuvrörelse kan därför uteslutas (Raiko et al. 2010).

Det dimensionerande lastfallet är en skjuvlast som efterföljs av 30 MPa isostatisk last. Fallet ger upphov till effektivspänningen 340 MPa enligt von Mises i insatsen, vilket i sin tur motsvarar 2,55 % provstavsförlängning på den spännings-töjningskurva som fastställts vid dragprovning av segjärn från BWR-insatserna I53-I57, se Figur 5-3. Detta är ett pessimistiskt sätt att fastställa vilken plastisk töjning som uppstår i segjärnet. Den plastiska ekvivalenta töjningen i segjärnet uppgår till endast 1 % för det dimensionerande fallet enligt Raiko et al. (2010, Table 6-3). Töjningen 2,55 % som bestäms från analysen är endast cirka 40 % av den kravställda töjningen 6,3 % och endast cirka 20 % av medelutfallet från provstavarna i skivorna från toppändarna av BWR serien I53-I57.



Figur 5-3. Jämförelse mellan beräknad spänning/plastisk töjning vid 2,55 % i insatsen i slutförvaret (blå streckad linje), krav på brottförlängning 6,3 % (grön streckad linje) samt medelutfallet 12,6 % brottförlängning av dragprovstavar ifrån toppskivorna av I53-I57 (röd streckad linje). Figuren kommer ifrån Raiko et al. (2010, Figure 6-2).

5.5 Korrosionsangrepp

Korrosion utreds inom ramen för säkerhetsanalysen. Som konstruktionsförutsättning ges en minsta koppardtjocklek vid deponeringstillfället. För utformningen av kapsel innebär detta att metoder för tillverkning och provning av kopparhöljet ska visas dugliga att leverera tillverkade kapslar med denna tjocklek.

5.6 Kriticitet

Underkriticitet upprätthålls genom att valet av bränsleelement för inkapsling görs utifrån acceptanskriterier baserade på en kriticitetsanalys där de detaljer i kapselns geometri, materialsammansättning och materialegenskaper som påverkar reaktiviteten ligger inom de intervall som anges för referensutformningen (SKB 2010d).

För att acceptanskriterierna för val av element ska vara giltiga måste de dimensioner, materialegenskaper, största defekter och halter av olika ämnen i insats och kopparhölje som anges i kriticitetsanalysen verifieras i kapselproduktionen.

5.7 Planer för fortsatt arbete

För att komplettera den samlade kravbild för kapseln, har SKB identifierat ett antal åtgärder som planeras genomföras inför PSAR. Planerna syftar till att beakta ändrade konstruktionsförutsättningar, beakta nyvunnen kunskap som erhållits från forskning och utveckling samt att vidare utveckla kravbild för oförstörande provning och tillverkning av kapselkomponenter.

För isostatlastfallet 50 MPa återstår det att genomföra en skadetålighetsanalys för att erhålla tillåtna defekter i BWR- och PWR-insatsen med utgångspunkt från tabell 5-1 till tabell 5-4.

SKB har för avsikt att för koppren vidare utreda kopplingen mellan acceptabel töjning härledd från provning och beräknad plastisk töjning inklusive kryp, inverkan av treaxligt spänningstillstånd ska också beaktas. Aktiviteter pågår med avsikten att mer fullständigt kartlägga inverkan av treaxlighetseffekter och inhomogen deformation vid provningen. Därtill planerar SKB att vidare utveckla beräkningsmetoderna för krypdeformation och elasto-plastisk deformation i kopparhöljet för att ytterligare reducera osäkerheter i beräkningarna samt att vidareutveckla den numeriska diskretiseringen av den beräkningsmodell som använts vid den finita element-lösningen i SKBdoc 1399768 då det förekom problem med bitvis grov diskretisering i beräkningsmodellen.

SKB har för avsikt att vidare analysera kraven på brottförlängning samt tillåtna defektstorlekar för BWR- och PWR-insatsen. Målsättningen är att göra en mer fullständig analys för fler positioner över BWR- respektive PWR-tvårsnittet samt att motivera provningsbegränsningar i områden med komplicerad geometri såsom bland annat bakom stagplåtar, i närheten av kanälrören och i toppen på insatsen. Därtill har SKB för avsikt att genomföra känslighetsanalyser med avseende på mycket stora initiala sprickor mellan kanälrören för BWR- och PWR-insatserna med syftet att motivera provningsbegränsningar samt för att få ökad förståelse för kapselns mekaniska funktion vid dessa mycket pessimistiska defekter vid skjuvlastfallet.

SKB har även för avsikt att utreda inverkan av den minskade styvhet i bufferten, enligt den revidering av konstruktionsförutsättningarna för bufferten som planeras enligt avsnitt 3.2.1. Eftersom bentonitens styvhet minskar kommer även påkänningarna i kapseln att minska, vilket i sin tur ökar de acceptabla defektstorlekarna enligt tabell 5-5 och tabell 5-6.

6 Kontroll och styrning av egenskaper i produktionen

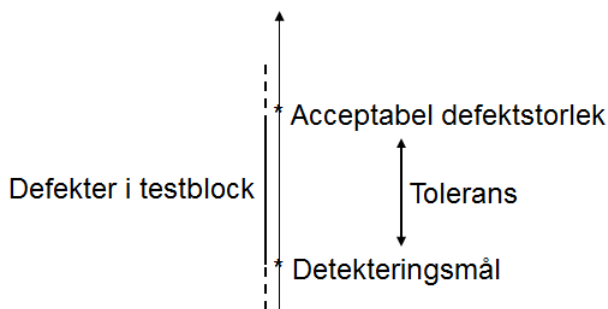
Produktionen av kapselkomponenter sker mot definierade tillverkningskrav. Tillverkningskraven är formulerade så att de acceptabla värdena på designparametrarna som anges för kapselns referensutformning uppfylls, se avsnitt 4. Det betyder att tillverkningskraven är minst lika skarpa som i referensutformningen, men i många fall skarpare. Referensutformningen gäller oberoende av vald produktionsmetod, tillverkningskraven kan däremot variera för att säkerställa låg restriktion för att provad och kontrollerad designparameter inte ska avvika från de angivna acceptabla värdena någonstans i komponenten. Relationen mellan referensutformnings designparametrar och tillverkningskraven för respektive kapselkomponent och svetsar beskrivs i avsnitten 6.1-6.4.

Skillnaden mellan acceptabla värden i referensutformningen och tillverkningskrav beror bland annat av stabiliteten i vald produktionsmetod, relationen mellan egenskaper i provat område och

komponentens egenskaper och tillgång till standarder. Detta betyder att tillverkningskraven kan sättas olika om alternativa produktionsmetoder kvalificeras för tillverkning av en komponent. De slutgiltiga kraven verifieras i samband med kvalificeringen av tillverkningsprocessen hos vald leverantör.

Oförstörande provning ska säkerställa att kapseln är fri från icke acceptabla defekter som kan uppkomma under tillverkningen. Troliga och möjliga defekter beskrivs och analyseras (se avsnitt 5.1 och Figur 5-1) och defektparametrar från dessa analyser kompletterat med toleranser och osäkerheter baserat på de valda provningsteknikerna ligger till grund för bestämning av detekteringsmålen, se Figur 6-1. Dessa detekteringsmål som utgör en direkt kravbild för den aktuella provningen är samtidigt indata till kvalificeringsprocessen för samma provning. För kvalificering av provningsteknik används testblock med artificiella och/eller verkliga defekter inom ett relevant storleksintervall.

Komponenternas provbarhet med en provningsteknik är beroende på de acceptabla defektparametrarna, komponenternas geometri, konstruktionsmaterialen, de aktuella defekternas egenskaper och variationer.



Figur 6-1. Schematisk beskrivning av relationen mellan acceptabel defektstorlek och detekteringsmål för oförstörande provning.

6.1 Gjutning av segjärnsinsats

6.1.1 Materialsammansättning

Tillverkningskraven avseende materialsammansättning för att förhindra kriticitet och försprödning av segjärnet är i princip identiska med de acceptabla värden som presenteras för referensutformningen i Tabell 4-1. För att styra gjutprocessen mot att uppfylla kraven på materialegenskaper används dock snävare intervall som styrparametrar, se avsnitt 6.1.2.

Som ett led i kvalificering av processen kontrolleras materialsammansättningen i den färdiga produkten för att säkerställa att processen ger en homogen materialsammansättning i hela insatsens volym. Vid produktion av insatser kontrolleras materialsammansättningen genom kemisk analys av smältan enligt standardiserade metoder.

6.1.2 Materialegenskaper

Kraven på referensutformningen (Tabell 4-2) har härletts utifrån de genomförda design- och skadetålighetsanalyserna för BWR- och PWR-insatserna. Kraven på referensutformningen har sedan använts för att ange krav på de materialegenskaper som ska uppnås vid tillverkning. SKB har med ledning av erfarenhet från den valda tillverkningsprocessen bestämt de tillverkningskrav på insatsmaterialet för BWR och PWR som redovisas i Tabell 6-1. Tillverkningskraven på sträck- och brottgräns har tagits fram med stöd av standard för segjärn "SS-EN1563:2012" enligt specifikationen "grade EN-GJS-400-15". Valda tillverkningskrav sammanfaller eller är något skarpare än standardens krav. Kraven på brottseghet och brottförlängning har utgått från de värden som anges i kapselns referensutformning och avrundats uppåt.

Enligt standarden för segjärn "SS-EN 1563:2012" så ska huvuddelen av grafiten föreligga som form V och VI i enlighet med EN ISO 945-1:2008. Vidare anges det i standarden att erfarenhetsmässigt bör

minst 80 % av grafiten föreligga som form V och VI för att uppnå de mekaniska dragegenskaper som standarden specificerar. Förutsättningen är att segjärnets grundmassa (matris) justeras riktigt. För materialkvalitet "EN-GJS-400-15" ska matrisen vara ferritiskt. Även i ett ferritiskt segjärn så finns det alltid inslag av perlit. Enligt litteraturstudier kan max 10 % perlit oftast accepteras (SKBdoc 1265058). Från SKB:s provgjutningar finns dock exempel på att krav på brottseghet uppnåtts trots 30 % perlit och att krav på brottförlängning uppnåtts trots 20 % perlit.

Tabell 6-1. Tillverkningskrav med avseende på materialegenskaper.

Designparameter	Tillverkningskrav inklusive eventuellt omprov
Brottseghet vid initiering av spricktillväxt JIC vid 0 °C – 20 °C	BWR >35 kN/m PWR >30 kN/m
Brottseghet vid 2 mm stabil spricktillväxt J2mm vid 0 °C – 20 °C	BWR >90 kN/m PWR >80 kN/m
Sträckgräns i drag, teknisk spänning vid 20 °C	>245 MPa
Sträckgräns i tryck, teknisk spänning vid 20 °C	>245 MPa
Brottgräns i drag, teknisk spänning vid 20 °C	>373 MPa
Brottförlängning A ₅ vid 0-20 °C, linjär normaltöjning	>7 %
Krav på grafитens form	Minimum 80 % av grafiten ska föreligga som form V och VI enligt SS-EN ISO 945. Form I och II inte är tillåtet.
Perlitihalt	<10 % perlit

Kraven i Tabell 6-1 verifieras genom förstörande provning av dragprovstavar, brottseghetsprovstavar samt processkontroll av gjutprocessen. Detta görs dels som ett led i kvalificering av processen då materialegenskaperna kontrolleras i den färdiga produkten för att säkerställa att processen ger materialegenskaper i hela insatsens volym som uppfyller kraven. Omfattningen av denna provning kommer fastställas i planeringen av processkvalificeringen. Vid reguljär produktionen av insatser kontrolleras materialegenskaperna genom provuttag från en toppskiva som tas ut direkt ovanför insatsens topp. De mekaniska egenskaperna provas enligt SS-EN ISO 6892-1:2009 och SS-EN 1563:2012 och bedömning av grafитens form görs enligt SS-EN ISO 945-1:2008.

Kraven i Tabell 6-1 för dessa respektive egenskaper har härletts så att de gäller oberoende av varandra, samtliga krav ska uppnås för respektive provstav. Om en provstav inte klarar kravet kan det tas ut omprov i en position som motsvarar den underkända stavens läge i insatsen. På detta sätt kan en enstaka lokal felaktighet som inte förväntas förekomma i provet eller provningstekniska fel beaktas vid kontrollen (SS 11 01 03, 1985).

För att styra gjutprocessen mot att uppfylla kraven på materialegenskaper ställs krav på processspecifika parametrar som exempelvis tappetid och gjuttemperatur och dessutom på kemisk sammansättning. För aktuell gjutprocess gäller den materialsammansättning som ges i Tabell 6-2. Referensutformningens acceptabla värden avseende materialsammansättning enligt Tabell 4-1 är uppfylld med den preliminära specifikationen i Tabell 6-2. De slutliga tillverkningskraven kommer att fastställas före kvalificering av varje individuell gjutprocess.

Tabell 6-2. Preliminär specifikation av materialsammansättning vid gjutning av segjärnsinsats.

Fe (vikt%)	C (vikt%)	Si (vikt%)	Mn (vikt%)	P (vikt%)	S (vikt%)	Ni (vikt%)	Cu (vikt%)	Mg (vikt%)
>90	3,2 – 4,0	1,5 – 2,8	0,05 – 1,0	<0,08	>0,02	0 – 2,0	< 0,05	0,02 – 0,08

SKB har för avsikt att vidare utreda tillverkningskraven avseende materialegenskaper. Därmed kan värdena i Tabell 6-1 och Tabell 6-2 ändras i takt med att alternativa produktionsmetoder utvecklas. Tilläggskrav som omfattar tillåten spridning för de uttagna provstavarna kan behöva införas för att

garantera och kontrollera risken för att inte uppnå överensstämmelse med acceptabla värden i referensutformningen någonstans i insatsen volym.

6.1.3 Dimensioner

Tillverkningskraven avseende dimensioner är identiska med referensutformningen som presenteras i Tabell 4-3 och Tabell 4-4. Kontroll av insatsens slutliga dimensioner görs med konventionell mätteknik med undantag för kantavståndet som kontrolleras med ultraljudteknik (SKBdoc 1434744).

6.1.4 Defekter

Med utgångspunkt från analys av gjutprocessen för segjärn har olika defekttypen identifierats. Som resultat av genomförda skadetålighetsanalyser av BWR- respektive PWR-insatsens referensutformning avseende dimensioner och mekaniska egenskaper har acceptabla storlekar definierats för dessa defekter (SKBdoc 1414760). Ur dessa krav har preliminära krav på acceptabla defektstorlekar, för de olika zonerna definierade i Figur 5-2, härletts. De redovisas i Tabell 6-3 till Tabell 6-8 (SKBdoc 1434744).

Tabell 6-3. Maximal acceptabel storlek för volymetriska defekter, BWR-insats.

Defekt	Diameter ¹⁾ [mm]				
	A	B1	B2	C	D
Sugning	40	60	20	20	20
Sugningsporer	40	60	20	20	20
Kärnstödsblåsor	40 ²⁾	60	20	20	20
Blåsor	40	60	20	20	20

- 1) Beräkningarna är gjorda för defekter i form av cylindrar med en längd som motsvarar insatsens längd och därför har inget krav på maximal acceptabel axiell storlek definierats.
- 2) Kärnstödsblåsor förväntas endast uppkomma i anslutning till kassetten. Om de uppkommer i detta område definieras de som "blåsor".

Tabell 6-4. Maximal acceptabel storlek för axiella defekter, BWR-insats

Defekt	Djup/höjd (axiell längd i parentes), [mm]					
	A, 0-2 mm från ytan	A, >2 mm från ytan	B1	B2	C	D
Slaggineslutningar	37 (222)	37 (222)	65 (393)	50 (300)	24 (144)	32 (196)
Sandineslutningar ¹⁾	37 (222)	37 (222)	65 (393)	50 (300)	24 (144)	32 (196)
Varmsprickor	37 (222) ²⁾	37 (222) ²⁾	65 (393) ²⁾	50 (300) ²⁾	24 (144) ²⁾	32 (196)

- 1) Sandineslutningar bedöms uppträda på liknande sätt som slaggineslutningar.
- 2) Sannolikheten att varmsprickor förväntas uppkomma i dessa volymer av insatsen anses vara mycket låg (SKBdoc 1471002). Behovet av detta krav kommer därmed utredas vidare.

Tabell 6-5. Maximal acceptabel storlek för defekter med huvudsaklig orientering i omkretsled, BWR-insats

Defect	Radiellt djup/höjd (storlek i omkretsled i parentes), [mm]					
	A, 0-2 mm från ytan ¹⁾	A, >2 mm från ytan	B1	B2	C	D
Slaggineslutningar	4,5 (27) 8,2 (16,4)	>10 (>60)	>10 (>60)	>10 (>60)	>10 (>60)	>10 (>60)
Sandineslutningar ²⁾	4,5 (27) 8,2 (16,4)	>10 (>60)	>10 (>60)	>10 (>60)	>10 (>60)	>10 (>60)

- 1) Beräkningar är gjorda för två olika längd/djup-förhållanden, baserat på postulerade halvcirkulära och halvelliptiska defektgeometrier.
- 2) Sandineslutningar bedöms uppträda på liknande sätt som slaggineslutningar.

Tabell 6-6. Maximal acceptabel storlek för volymetriska defekter, PWR-insats.

Defekt	Diameter ¹⁾ [mm]			
	A	B	C	D
Sugning	80	100	100	20
Sugningsporer	80	100	100	20
Kärnstödsblåsor	80 ²⁾	100	100	20
Blåsor	80	100	100	20

- 1) Beräkningarna är gjorda för defekter i form av cylindrar med en längd som motsvarar insatsens längd och därför har inget krav på maximal acceptabel axiell storlek definierats.
- 2) Kärnstödsblåsor förväntas endast uppkomma i anslutning till kassetten. Om de uppkommer i detta område definieras de som "blåsor".

Tabell 6-7. Maximal acceptabel storlek för axiella defekter, PWR-insats.

Defekt	Djup/höjd (axiell längd i parentes), [mm]				
	A, 0-2 mm från ytan	A, >2 mm från ytan	B	C	D
Slaggineslutningar	53 (318)	53 (318)	112 (672)	104 (624)	31(186)
Sandineslutningar ¹⁾	53 (318)	53 (318)	112 (672)	104 (624)	31(186)
Varmsprickor	53 (318) ²⁾	53 (318) ²⁾	112 (672) ²⁾	104 (624) ²⁾	31 (186)

- 1) Sandineslutningar bedöms uppträda på liknande sätt som slaggineslutningar.
- 2) Sannolikheten att varmsprickor förväntas uppkomma i dessa volymer av insatsen anses vara mycket låg (SKBdoc 1471002). Behovet av detta krav kommer därmed utredas vidare.

Tabell 6-8. Maximal acceptabel storlek för defekter med huvudsaklig orientering i omkretsled, PWR-insats.

Defekt	Radiellt djup/höjd (storlek i omkretsled i parentes), [mm]				
	A, 0-2 mm från ytan ¹⁾	A, >2 mm från ytan	B ¹⁾	C	D
Slaggineslutningar	4,1 (24.6) 7,5 (15)	>10 (>60)	>10 (>60) >20 (>20) ²⁾	Beräkningar saknas	>10 (>60)
Sandineslutningar ³⁾	4,1 (24.6) 7,5 (15)	>10 (>60)	>10 (>60) >20 (>20) ²⁾	Beräkningar saknas	>10 (>60)

- 1) Beräkningar är gjorda för två olika längd/djup-förhållanden, baserat på postulerade halvcirkulära och halvelliptiska defektgeometrier.
- 2) Avser inre delen av denna zon.
- 3) Sandineslutningar bedöms uppträda på liknande sätt som slaggineslutningar.

För att säkerställa att tillverkningskraven avseende defekter uppfylls, planeras oförstörande provning med kvalificerad provningsteknik i kapselfabriken. Beskrivning av hittills utvecklad provningsteknik och aktuell status redovisas i (SKBdoc 1434744).

6.2 Tillverkning av stållock

För tillverkning av stållocket kan stålplåt enligt standard "EN 10025 S355J2G3" (t=40-63 mm) eller motsvarande stålsort med minst samma brottspänning och brottöjning användas i varmvalsat eller normaliserat tillstånd (Raiko et al. 2010). Den kemiska sammansättningen och de mekaniska egenskaperna ska uppfylla kraven enligt standarden för materialet.

Enligt avsnitt 5.2.2 har i dagsläget inga acceptanskriterier avseende defekter i stållocket definierats.

6.3 Tillverkning av kopparkomponenter

6.3.1 Materialsammansättning

Tillverkningskraven i Tabell 6-9. avseende materialsammansättning är i princip identiska med de acceptabla värden som anges för referensutförningen i Tabell 4-7. Det som skiljer är tillåten

svavelhalt som är lägre och har anpassats till de standarder för kopparkvalitet som avses användas och tillåten syrehalt eftersom referensutformningen tar höjd för eventuell risk för syretillförsel vid svetsning.

Tabell 6-9. Tillverkningskraven för den kemiska sammansättningen på rör, lock och botten.

Designparameter	Tillverkningskrav
Kopparkvalitet	EN 1976 grade Cu-OFE eller Cu-OF1 eller ASTM C10100
Koppar (Cu)	≥ 99,99 %
Fosfor (P)	30-100 ppm
Svavel (S)	<8 ppm
Väte (H)	<0,6 ppm
Syre (O)	<5 ppm

Som ett led i kvalificering av processen kontrolleras materialsammansättningen i den färdiga produkten för att säkerställa att processen ger en homogen materialsammansättning i hela kopparrörlets volym. Vid produktion av kopparkomponenterna kontrolleras materialsammansättningen genom kemisk analys av smältan vid göttillverkning enligt standardiserade metoder.

6.3.2 Materialegenskaper

Tillverkningskraven (Tabell 6-10) avseende materialegenskaper baseras på referensutformningen presenterad i Tabell 4-8. SKB:s erfarenhet av provning av koppar har visat att om tillverkningskraven avseende materialsammansättning (Tabell 6-9) samt brottförlängning och brottkontraktion vid elastoplastisk dragprovning (Tabell 6-10) uppfylls så uppfylls även krypduktiliteten enligt kapselns referensutformning. Utfall från krypprovning av koppar inklusive svetsar (FSW) ges av Andersson-Östling och Sandström (2009).

Tabell 6-10 anger tillverkningskraven för de mekaniska egenskaperna på kopparkomponenterna rör, lock och botten (Raiko et al. 2010, SKB 2010a, SKBdoc1175208). Medelkornstorleken bedöms enligt ASTM E112, som är en amerikansk standard för kornstorleksbedömning. 360 µm motsvarar ungefär ”Grain Size No. G 0” och alla tal större än noll innebär att kornstorleken är finare än så, till exempel ”Grain Size No. G 4” motsvarar en kornstorlek på cirka 90 µm.

Tabell 6-10. Tillverkningskraven för de mekaniska egenskaperna på röret, locket och botten.

Designparameter	Tillverkningskrav
Brottförlängning	>40 % för varje stav, enaxlig dragprovning (SKB 2010a)
Brottkontraktion	>80 % för varje stav, enaxlig dragprovning (Raiko et al. 2010)
Medelkornstorlek	< 360 µm ASTM E112 (SKBdoc 1175208)

Som ett led i kvalificering av processen kontrolleras materialegenskaperna i den färdiga produkten för att säkerställa att processen ger en homogen materialsammansättning i hela kopparrörlets volym. Vid produktion av kopparkomponenterna kontrolleras materialegenskaperna genom uttag i kopparröret och kopparrörbotten samt i prover tagna i anslutning till kopparrörets ändar med provning enligt standardiserade metoder.

6.3.3 Dimensioner

Tillverkningskraven avseende dimensioner är identiska med referensutformningen som presenteras i Tabell 4-9. Kontroll av kopparkomponenternas slutliga dimensioner görs med konventionell mätteknik.

6.3.4 Defekter

Enligt SKB (2010a, tabell 7-3) tolereras i referensutförningen en lokal reduktion <10 mm på grund av defekter i kopparrör. Baserat på detta har, för de defekter som identifierats, preliminära acceptabla defektstorlekar definierats (SKBdoc 1414374). Ur dessa krav har preliminära krav på acceptabla defektstorlekar, inklusive uppdaterade krav på hanteringsdefekter (främmande partiklar och slagskador), härletts enligt Tabell 6-11 till Tabell 6-15 (SKBdoc 1434744).

Tabell 6-11. Maximal acceptabel defektstorlek för koppargöt för tillverkning av kopparrör¹⁾.

Defekt	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ mantelyta	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ ändytor
Intryckning av främmande partiklar	25	18
Kallflytningar	10	3)
Sprickor	10	3)
Slagskador/ lokala plasticeringar	25	18
Spider cracks	3)	18

1) Det preliminära kravet innebär att OFP ska detektera halva den acceptabla defektstorleken.

2) Hittills har endast krav definierats med avseende på defektdjup.

3) Acceptanskriterier ställs endast på de ytor där defekterna kan förväntas uppkomma.

Tabell 6-12. Maximal acceptabel defektstorlek för blocker för tillverkning av kopparrör¹⁾.

Defekt	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ mantelyta	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ ändytor
Intryckning av främmande partiklar	10	10
Slagskador/ lokala plasticeringar	18	10
Exogena slaggar	10 ³⁾	10 ³⁾

1) Det preliminära kravet innebär att OFP ska detektera halva den acceptabla defektstorleken.

2) Hittills har endast krav definierats med avseende på defektdjup.

3) Acceptanskravet för exogena slaggar gäller även inre defekter. Acceptabelt djup/höjd avser storlek i radiell riktning.

Tabell 6-13. Maximal acceptabel defektstorlek för kopparrör¹⁾.

Defekt	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ mantelyta	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ ändytor
Intryckning av främmande partiklar	10	3)
Slagskador/ lokala plasticeringar	10	3)
Axiella repor	10 ⁴⁾	5)

1) Det preliminära kravet innebär att OFP ska detektera halva den acceptabla defektstorleken.

2) Hittills har endast krav definierats med avseende på defektdjup.

3) Hittills har inga specifika krav definierats för rörets fogytor före svetsning.

4) Kriteriet avser både rörets in- och utsida.

5) Acceptanskriterier ställs endast på de ytor där defekterna kan förväntas uppkomma.

Tabell 6-14. Maximal acceptabel defektstorlek för koppargöt för tillverkning av kopparlock¹⁾.

Defekt	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ mantelyta	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ ändytor
Intryckning av främmande partiklar	6,5	10
Kallflytningar	6,5	3)
Sprickor	6,5	3)
Slagskador/ lokala plasticeringar	6,5	10

1) Det preliminära kravet innebär att OFP ska detektera halva den acceptabla defektstorleken.

2) Hittills har endast krav definierats med avseende på defektdjup.

3) Acceptanskriterier ställs endast på de ytor där defekterna kan förväntas uppkomma.

Tabell 6-15. Maximal acceptabel defektstorlek för kopparlock¹⁾.

Defekt	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ mantelyta	Acceptabel djup/höjd [mm] ²⁾ ändytor
Intryckning av främmande partiklar	10	10
Oxidstråk	10	10
Smidesveck	3)	10
Slagskador/ lokala plasticeringar	10	10
Exogena slaggar	10 ⁴⁾	10

1) Det preliminära kravet innebär att OFP ska detektera halva den acceptabla defektstorleken.

2) Hittills har endast krav definierats med avseende på defektdjup.

3) Acceptanskriterier ställs endast på de volymer där defekterna kan förväntas uppkomma.

4) Acceptanskravet för exogena slaggar gäller även inre defekter. Acceptabelt djup/höjd avser storlek i radiell riktning.

För att säkerställa att tillverkningskraven avseende defekter uppfylls, planeras oförstörande provning av kopparkomponenterna med kvalificerad provningsteknik i kapselfabriken. Beskrivning av hittills utvecklad provningsteknik och aktuell status redovisas i SKBdoc 1434744.

6.4 Svetsning av kopparhöljet

6.4.1 Materialsammansättning

Tillverkningskraven (Tabell 6-16) avseende materialsammansättning är i princip identiska med referensutformningen som presenteras i Tabell 4-7. Det som skiljer är tillåten svavelhalt, som är lägre och har anpassats till de standarder för kopparkvalitet som avses användas, samt tillåten syrehalt som är under utredning.

Tabell 6-16. Tillverkningskraven för den kemiska sammansättningen i svetsen.

Designparameter	Tillverkningskrav
Kopparkvalitet	EN 1976 grade Cu-OFE eller Cu-OF1 eller ASTM C10100
Koppar (Cu)	≥ 99,99 %
Fosfor (P)	30-100 ppm
Svavel (S)	<8 ppm
Väte (H)	<0,6 ppm
Syre (O)	utredning krävs för att fastställa det numeriska kravet

Som en del av kvalificering av svetsprocessen kontrolleras materialsammansättningen i svetsgodset enligt standardiserade metoder.

6.4.2 Materialegenskaper

Kraven på svetsgodsets mekaniska egenskaper är identiska med tillverkningskraven (se Tabell 6-17) för de mekaniska egenskaperna på kopparkomponenterna det vill säga rör, lock och botten (Raiko et al. 2010, SKB 2010a, SKBdoc1175208).

Tabell 6-17. Tillverkningskraven för de mekaniska egenskaperna i svetsen.

Designparameter	Tillverkningskrav
Brottförlängning	>40 % för varje stav, enaxlig dragprovning (SKB 2010a)
Brottkontraktion	>80 % för varje stav, enaxlig dragprovning (Raiko et al. 2010)
Medelkornstorlek	< 360 µm ASTM E112 (SKBdoc 1175208)

Som en del av kvalificering av svetsprocessen provas och kontrolleras materialsammansättningen i svetsgodset enligt standardiserade metoder.

6.4.3 Dimensioner

Kraven avseende dimensioner efter svetsning och bearbetning är identiska med referensutformningen som presenteras i Tabell 4-1. Provning av svetsens slutliga dimensioner görs med konventionell mätteknik.

6.4.4 Defekter

Enligt SKB (2010a, tabell 7-3) tolereras i referensutformningen en lokal reduktion av koppartjockleken <10 mm på grund av defekter i kopparhöljet. Baserat på detta har, för de defekter som identifierats, preliminära acceptabla defektstorlekar definierats (SKBdoc 1415307). Ur dessa har preliminära krav på acceptabla defektstorlekar härletts enligt Tabell 6-18 (SKBdoc 1434744).

Tabell 6-18. Maximal acceptabel defektstorlek för FSW.

Defekt	Acceptabel radiell storlek [mm] ¹⁾
Kavititet	5
Foglinjeböjning	5
Kvarvarande fog	5

1) För närvarande har inget acceptanskrav definierats med avseende på storlek i axiell- eller omkretsled.

Inget acceptanskrav ställs med avseende på rester av verktygsmaterial vid provning av svetsen. Krav kommer istället att utarbetas med avseende på tillåtet slitage på svetsverktyget.

För att säkerställa att kraven avseende defekter i svetsen uppfylls planeras oförstörande provning med kvalificerad provningsteknik, för bottensvetsen i kapselfabriken, och för förslutningssvetsen i inkapslingsanläggningen. Beskrivning av hittills utvecklad provningsteknik och aktuell status redovisas i SKBdoc 1434744.

6.5 Planer för fortsatt arbete

SKB avser att till PSAR utarbeta uppdaterade tillverkningskrav för kapselns olika delar.

Baserat på de förnyade analyserna av kapselns mekaniska integritet som redovisas i avsnitt 5.7 planeras arbete inom följande områden:

- Uppdatering av krav på materialegenskaper för insatsen med avseende på acceptabla värden, eventuella krav på spridning mellan provstavar och omfattning av provuttag.
- Utredning om eventuellt behov att komplettera med krav på förekomst av karbider eller defekta grafittyper, så som ”chunky grafit”, i strukturen.

- Utarbeta acceptanskriterier för stålloket för de externa laster som definieras i konstruktionsförutsättningarna med utgångspunkt från det förfarande som beskrivs i SKBdoc 1451358.

För kopparhöljet planerar SKB att vidare utreda kravet på medelkornstorlek i kopparkomponenterna. Detta kan medföra att ett tilläggskrav rörande ljuddämpning kan behöva definieras för att ultraljudprovningens tillförlitlighet ska kunna säkerställas.

Som nämns i avsnitt 6.4.1 har inget numeriskt värde avseende krav på tillåten syrehalt i svetsen definierats. Som följd av detta genomför SKB för närvarande en utredning med syfte att definiera hur acceptanskriterier avseende syrehalt och oxidpartiklar i svetsen ska definieras (SKBdoc 1452923 ver 3.0 fråga 6). Utöver detta kommer acceptanskriterier avseende tillåtet slitage på svetsverket att utarbetas och baserat på dessa krav kommer kontroll/provning av verktyget definieras.

I SKBdoc 1434744 har SKB identifierat behov av förtydliganden och komplettering av de krav med avseende på defekter som utarbetats (SKBdoc 1414374, 1414760, 1415307). Detta har initierat arbete med uppdatering av acceptanskriterier avseende defekter enligt Figur 5-1 och omfattar:

- Kompletterande beräkningar av skadetåligheten, dels för att beräkna väl definierade acceptanskriterier för hela insatsvolymen och dels för att ta hand om de uppdaterade konstruktionsförutsättningar som anges i avsnitt 3.2.
- Analys av defekter genom framtagning av detaljerade defektbeskrivningar (inklusive relevanta defektparametrar) samt koppling av dessa till de acceptabla beräkningsdefekter som design- och skadetålighetsanalysen ger.
- Anpassning av krav på OFP, där så är möjligt, mot den praxis som används inom kärnkraftsindustrin.

I utvärderingen av utvecklad OFP-teknik (SKBdoc 1434744) mot kravbilddokumenten för oförstörande provning (SKBdoc 1414374, 1414760, 1415307) har behov av vidareutveckling av OFP-teknik identifierats. Med utgångspunkt från denna utvärdering och de aktiviteter avseende ovan nämnda framtagning av detaljerade defektbeskrivningar och uppdaterade acceptanskriterier har arbete initierats inom följande områden:

- I ett dokument (SKBdoc 1434744) redovisas att segjärnsinsatsens material har låg och homogen ljuddämpning, vilket möjliggör god provbarhet med ultraljud. SKB kommer dock arbeta vidare med att undersöka vilken variation i ultraljuddämpning som kan förväntas i insatsen och vilken effekt denna i så fall kan få på komponentens provbarhet.
- Undersökning av verkliga defekter i kapselkomponenterna och svetsar samt vilken inverkan variationer i defekttegenskaper har på de utvecklade oförstörande provningsteknikerna.
- För att ta fram verkliga defekter för de ovan nämnda undersökningarna tillverkas provobjekt med syfte att skapa defekter som anses vara troligt eller möjligt förekommande i kapselns komponenter och svetsar.
- Utveckling av teknik för ytprovning av segjärnsinsatsen med syfte på att uppfylla kraven med avseende på acceptabla ytdefekter.
- Utvärdering av behov av kompletterande teknik för provning av insatsens centrala volym, där geometrin tydligt påverkar provbarheten, samt undersöka möjligheten att vid behov tillämpa röntgen av denna volym.
- Utveckling av kompletterande ultraljudteknik med syfte på att uppfylla kraven med avseende på acceptabla defekter i de inre delarna av zon B, B1 och B2 i insatsen (Figur 5-2).
- Utveckling av teknik för ytprovning av kopparkomponenterna med syfte på att uppfylla kommande uppdaterade krav med avseende på acceptabla ytdefekter.

7 Slutsatser

Den samlade kravbild för kapseln omfattar de krav och förutsättningar som ligger till grund för kapselns konstruktion, specifikationerna av referensutformningen och acceptabla defekter vilka utgör grunden för de krav som behöver ställas på produktionen i form av processtyrning och kontroll av producerade komponenter och svetsar. Produktionen av kapslar sker mot tillverkningskrav som formuleras så att komponenter och svetsar uppfyller specifikationerna av referensutformningen och acceptabla defekter.

SKB redovisar också sina planer på en revision av vissa konstruktionsförutsättningar som påverkar kapselns konstruktion inför redovisningen av PSAR. De revisioner som planeras är relaterade till den högsta uppskattade islasten på slutförvaret, bedömning av sannolikheten för skjuvning av deponeringshål och en planerad uppdatering av buffertens säkerhetsfunktioner och motsvarande konstruktionsförutsättningar och utformning. Dessa förändringar påverkar såväl den isostatiska lasten som skjuvlasten på kapseln.

SKB:s referensutformning för kapseln presenteras i avsnitt 4. SKB har genomfört en översyn av de parametrar som beskriver gjutjärnsinsatsens och kopparhöljets materialegenskaper efter att ansökan lämnades in (SKBdoc 1288292). Översynen har lett till att specifikationen av referensutformningen har uppdaterats avseende några av dessa designparametrar. Materialegenskaperna för insatsens stållock har också specificerats mer i detalj som underlag för en specifik designanalys av locket (SKBdoc 1177857). SKB kommer att presentera en uppdaterad referensutformning i redovisningen av PSAR för Kärnbränsleförvaret.

De analyser av kapselns mekaniska hållfasthet som genomförts för att verifiera, och vid behov justera, de acceptabla värdena för de designparametrarna som specificerar referensutformningen samt utreda acceptabla defekter beskrivs i denna rapport. De analyser som genomförts är designanalys inklusive skadetålighetsanalys samt defektanalyser. Den översikt över dessa analyser som presenteras i Figur 5-1 syftar till att beskriva förutsättningarna för analyserna och hur resultaten från dessa används för att ställa krav på tillverknings- och kontrollprocesserna.

För att komplettera den samlade kravbild för kapseln, har SKB identifierat ett antal åtgärder som planeras genomföras inför PSAR. Planerna syftar till att beakta ändrade konstruktionsförutsättningar, beakta nyvunnen kunskap som erhållits från forskning och utveckling samt att vidare utveckla kravbild för oförstörande provning och tillverkning av kapselkomponenter.

Produktionen av kapselkomponenter sker mot definierade tillverkningskrav. Tillverkningskraven är formulerade så att de acceptabla värdena på designparametrarna som anges för kapselns referensutformning uppfylls, se avsnitt 4. Det betyder att tillverkningskraven är minst lika skarpa som i referensutformningen, men i många fall skarpare. Referensutformningen gäller oberoende av vald produktionsmetod, tillverkningskraven kan däremot variera för att säkerställa låg restriktion för att provad och kontrollerad designparameter inte ska avvika från de angivna acceptabla värdena någonstans i komponenten.

SKB avser att till PSAR utarbeta uppdaterade tillverkningskrav för kapselns olika delar. SKB har identifierat behov av förtydliganden och komplettering (SKBdoc 1434744) av de krav med avseende på defekter som utarbetats (SKBdoc 1414374, 1414760, 1415307). Detta har initierat arbete med uppdatering av acceptanskriterier avseende defekter.

Tillverknings- och provningsprocesserna för kapselkomponenter och svetsar kommer att vara kvalificerade innan SKB ansöker om tillstånd för provdrift av Kärnbränsleförvaret. SKB arbetar med att beskriva hur krav på genomförande av kvalificeringsprocessen ska styras av de olika kapselkomponenternas betydelse för KBS-3-förvarets strålsäkerhet samt av den planerade produktionen och möjligheterna att använda beprövad teknik. Kvalificeringen av varje tillverknings- eller provningsprocess kommer att behöva anpassas till den tillverkade eller provade komponentens betydelse för strålsäkerheten, tillgänglig beprövad teknik, tillgängliga standarder och normer samt de förhållanden som kommer att råda, såväl fysiska som organisatoriska, vid genomförandet i den planerade produktionen.

Referenser

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

Colleoni F, Wekerle C, Masina S, 2014. Long-term safety of a planned geological repository for spent nuclear fuel in Forsmark, Sweden: estimate of maximum ice sheet thicknesses. Application and numerical scenarios. SKB TR-14-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

Dillström Peter, Alverlind L, Andersson M, 2010. Framtagning av acceptanskriterier samt skadetålighetsanalyser av segjärnsinsatsen. SKB R-10-11, 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.

Karnland O, Olsson S, Nilsson U, 2006. Mineralogy and sealing properties of various bentonitesand smectite-rich clay minerals. SKB TR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009. Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. Updated 2013-01. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010a. Design, production and initial state of the canister. Updated 2013-10. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010b. Design and production of the KBS-3 repository. Updated 2013-10. SKB TR-10-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010c. Design, production and initial state of the buffer. Updated 2013-01. SKB TR 10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010d. Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. Updated 2011-12. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010e. Design, construction and initial state of the underground openings. Updated 2013-01. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Updated 2012-12. SKB TR-11-01, 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.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1175208 ver 8.0	Tillverkning av kapselkomponenter	SKB, 2013
1177857 ver 1.0	Designanalys av stållock till kapseln för använt kärnbränsle, geometriuppdatering, rapp nr 50008640-1	Inspecta Technology AB, 2011
1265058 ver 3.0	Toughness of ferritic nodular irons	Swerea, 2015
1288288 ver 2.0	Analysis of PWR canister inserts using data acquired from PWR material	Inspecta Technology AB, 2014
1288292 ver 1.0	Summary of important characteristic parameters for the insert, based on performed strength and damage tolerance analyses	Inspecta Technology AB, 2014
1339902 ver 1.0	Global simulation of copper canister-final deposition	5T Engineering AB, 2014
1365182 ver 1.0	Plan för implementering av kvalitetsstyrning och kontroll av KBS-3-förvaret	SKB, 2013
1371849 ver 3.0	Svar till SSM på begäran om komplettering rörande Kapselns mekaniska integritet	SKB, 2014
1388095 ver 1.0	Kvalitetsledningssystem för kapselproduktion	SKB, 2013
1395038 ver 2.0	Svar till SSM på begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättningar	SKB, 2015
1396769 ver 2.0	Svar till SSM på begäran om komplettering angående klimatfrågor	SKB, 2014
1399768 ver 2.0	Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads	5T Engineering AB, 2015
1403930 ver 1.0	Shearing of copper canister at top and base	5T Engineering AB, 2014
1404369 ver 2.0	Modelling of a canister with broken insert subjected to earthquake induced shear and subsequent glacial load	5T Engineering AB, 2014
1414374 ver 1.0	Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns rör, lock och botten	SKB, 2014
1414464 ver 1.0	Kvalificering av oförstörande provning	SKB, 2014
1414760 ver 1.0	Kravbild för oförstörande provning av segjärnsinsats	SKB, 2014
1415152 ver 2.0	Detailed models for PWR- and BWR-canisters for Earthquake induced rock shearing	5T Engineering AB, 2014
1415307 ver 1.0	Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns svetsar	SKB, 2014
1427299 ver 1.0	Modelling and analysis of canister with insert void defects for earthquake induced rock shear	5T Engineering AB, 2014
1434744 ver 2.0	Non-destructive testing of canister components and welds	SKB, 2015
1450913 ver 1.0	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	Inspecta Technology AB, 2015
1451358 ver 1.0	Canister Insert Steel Lid – Investigation into the need for damage tolerance analyses	Scanscot, 2015
1452923 ver 3.0	Svar till SSM på frågor i protokoll från kapselavstämningsmöte 25 juni 2014	SKB, 2015
1454226 ver 1.0	Hydrostatic pressure for detailed BWR/PWR-canisters	5T Engineering AB, 2015

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1459222 ver 1.0	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	Inspecta Technology AB, 2015
1471002 ver 1.0	Svar till SSM på begäran om förtydligande rörande kontroll och provning.	SKB, 2015