

DokumentID 1414760	Version 1.0	Status Godkänt	Reg nr	Sida 1 (20)
Författare Rikard Källbom Mikael Jonsson Håkan Rydén			Datum 2014-01-23	
Kvalitetssäkrad av Sabina Hammarberg (KG)			Kvalitetssäkrad datum 2014-02-28	
Godkänd av Jan Sarnet			Godkänd datum 2014-02-28	

Kravbild för oförstörande provning av segjärnsinsats

Innehåll

1	Inledning och syfte	2
2	Bakgrund	2
3	Avgränsningar	2
4	Gjutprocess och förekomst av makroskopiska defekter	3
4.1	Riskområden för defekter	3
5	Defektbeskrivningar och brottmekanisk klassificering	6
5.1	Sugningar	6
5.2	Gasblåsor	9
5.3	Sprickor	10
5.4	Inneslutningar	10
6	Acceptanskriterier	13
6.1	Acceptanskriterier för volymetriska och sprickliknande defekter	14
6.2	Acceptanskriterier för sprickliknande defekter med godtycklig riktning.	16
6.3	Närliggande defekter och ytnära defekter	16
7	Krav som ställs vid inspektion med OFP	17
7.1	Krav på detektering	17
7.2	Krav på lägesbestämning	17
7.3	Krav på karakterisering	17
7.4	Krav på storleksbestämning	17
8	Krav i områden med komplicerad geometri	17
8.1	Bottenplattan och området på toppens tvärsnitt	17
8.2	Stagplåtar	17
	Referenser	20

1 Inledning och syfte

Strålsäkerhetsmyndigheten SSM har i sin begäran om komplettering av SKB:s ansökan om slutförvar önskat en redovisning av defektstorlekar för detektering samt krav för storleksbestämning av dessa defekter; Punkt nr 2 och 3 ”Kontroll och provning för fastställande av kapselns initialtillstånd” (SSM, 2012). Dessutom har detaljerad information om krav på karakterisering med avseende på riktning, position och karakteristik för respektive defekt efterfrågats.

För att säkerställa att insatsen uppfyller de deterministiska kraven avseende hållfasthet behöver det verifieras att det inte förekommer defekter som äventyrar dess mekaniska integritet. För att få ett underlag för att kunna bedöma hur olika typer av defekter påverkar hållfastheten har SKB genomfört skadetålighetsanalyser baserade på postulerade idealiserade defekter i olika delar av insatsen. De defekter som postulerats som volymetriska defekter har modellerats som håligheter som motsvaras av inneslutningar samt plana defekter som motsvaras av sprickliknade defekter. Dessa idealiseringar måste jämföras mot verkliga defekter vars egenskaper i varierande grad skiljer sig mot idealiseringarna för att ställa upp acceptanskriterierna. SKB har i ansökan beskrivit möjliga defekter baserat på dels etablerad kunskap inom gjuteribranschen samt observationer vid utvärderingar av omfattande provgjutningar.

Syftet med detta dokument är att beskriva den kravbild för inspektion med oförstörande provning (OFP), som idag kan identifieras utgående från genomförda analyser och undersökningar.

För att ställa krav på inspektionen behöver förekomst av olika defekter anges, liksom deras fysikaliska egenskaper, deras brottmekaniska karakteristik samt acceptanskrav för storlek och position. Syftet med detta dokument är att ange dessa parametrar för de defekter som kan förekomma i gjutna segjärnsinsatser av typen BWR (boiling water reactor) och PWR (pressure water reactor). Dokumentet bygger på utvärderingen av de insatser som tillverkats med fallgjutning i sandform fram till och med år 2013.

2 Bakgrund

Tillverkningsprocessen för segjärnsinsatserna är översiktligt beskriven i ”Tillverkning av kapselkomponenter” (SKBdoc 1175208). I SKB (2010) redovisas tillverkningsystemet för kapselns olika delar och ”produktions/inspektionsscheman”. Figur 5-3 i SKB (2010) anger på en övergripande nivå de inspektioner med bland annat oförstörande provning som planeras genomföras för insatsen.

3 Avgränsningar

Dokumentet syftar till att beskriva kravbilden för inspektion fram till och med att kapseln transporterats till inkapslingsanläggningen enligt det flöde som anges i kapitel 6 i SKB (2010). Dokumentet behandlar enbart kravbilden avseende insatsens mekaniska integritet efter förslutning av slutförvaret.

4 Gjutprocess och förekomst av makroskopiska defekter

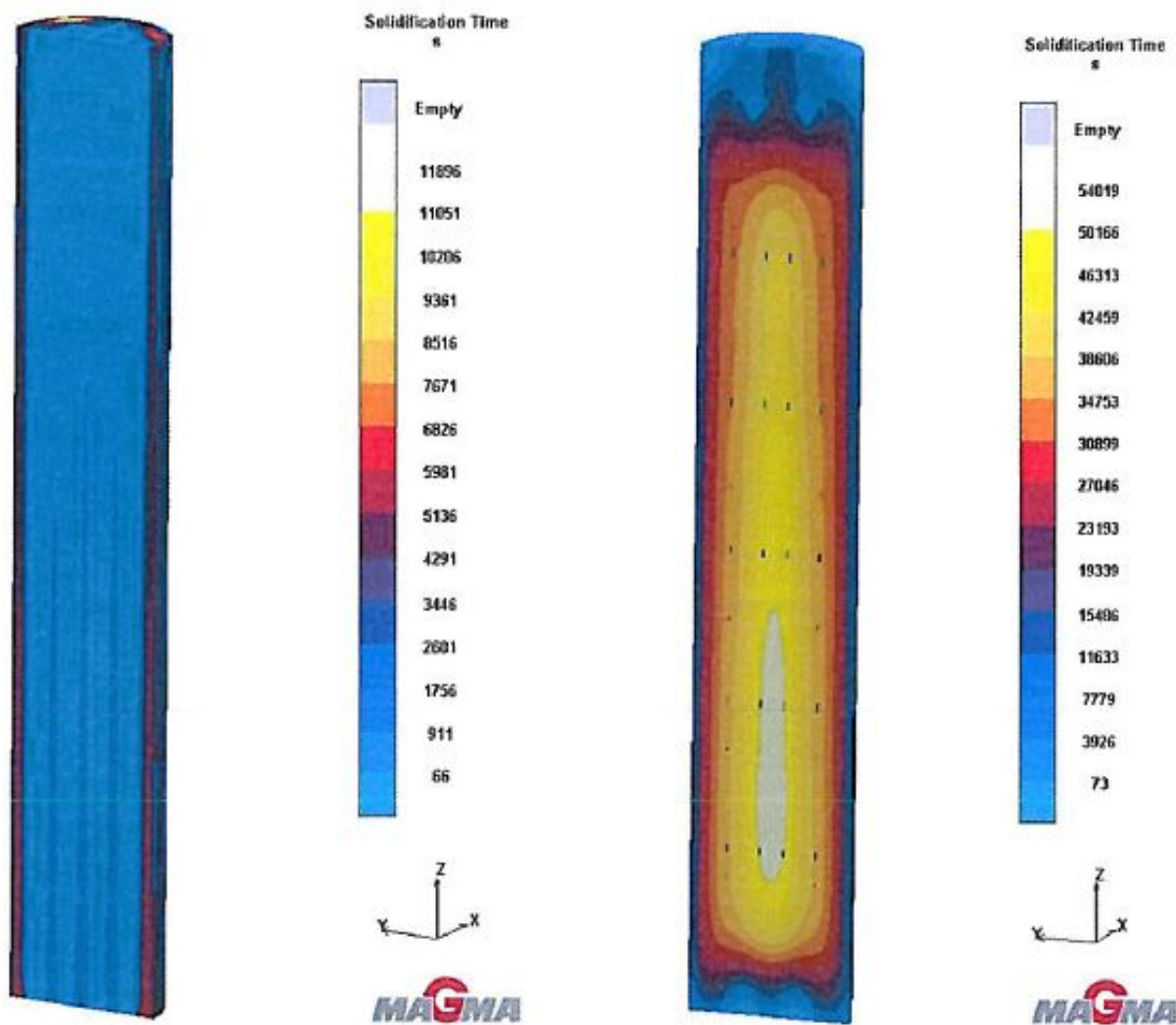
Segjärnets natur innebär att strukturen är inhomogen. Övergripande kan materialet beskrivas som en komposit bestående av en ferritisk matris med grafitnoder som ger materialet dess gynnsamma egenskaper dels ur gjuteritekisk synpunkt men även tålighet mot sprickpropagering. Vanligtvis finns inslag av perlit, mikroporositet, defekt grafit samt undantagsvis karbider i strukturen.

Dessa strukturbeståndsdelar förekommer i mikroskala och undersöks genom mekanisk provning samt strukturundersökningar. Förekomst av större defekter i form av kaviteter eller inneslutningar är direkt kopplade till smält-, gjut- och stelningsprocessen. Vid tillverkning av gjutgods är det viktigt att alla led i produktionsprocessen fortlöpande styrs och kontrolleras för att en jämn och erforderlig kvalitet skall uppnås. Avvikelser från rutiner samt avvikelser i parametrar som exempelvis temperatur, tid, kemisk sammansättning med mera kan orsaka såväl strukturella avvikelser som makroskopiska defekter. Även vid en väl styrd process medför komplexiteten bland gjutparametrar att både förstörande- och oförstörande provning behövs för att verifiera att en gjuten insats uppfyller hållfasthetskraven.

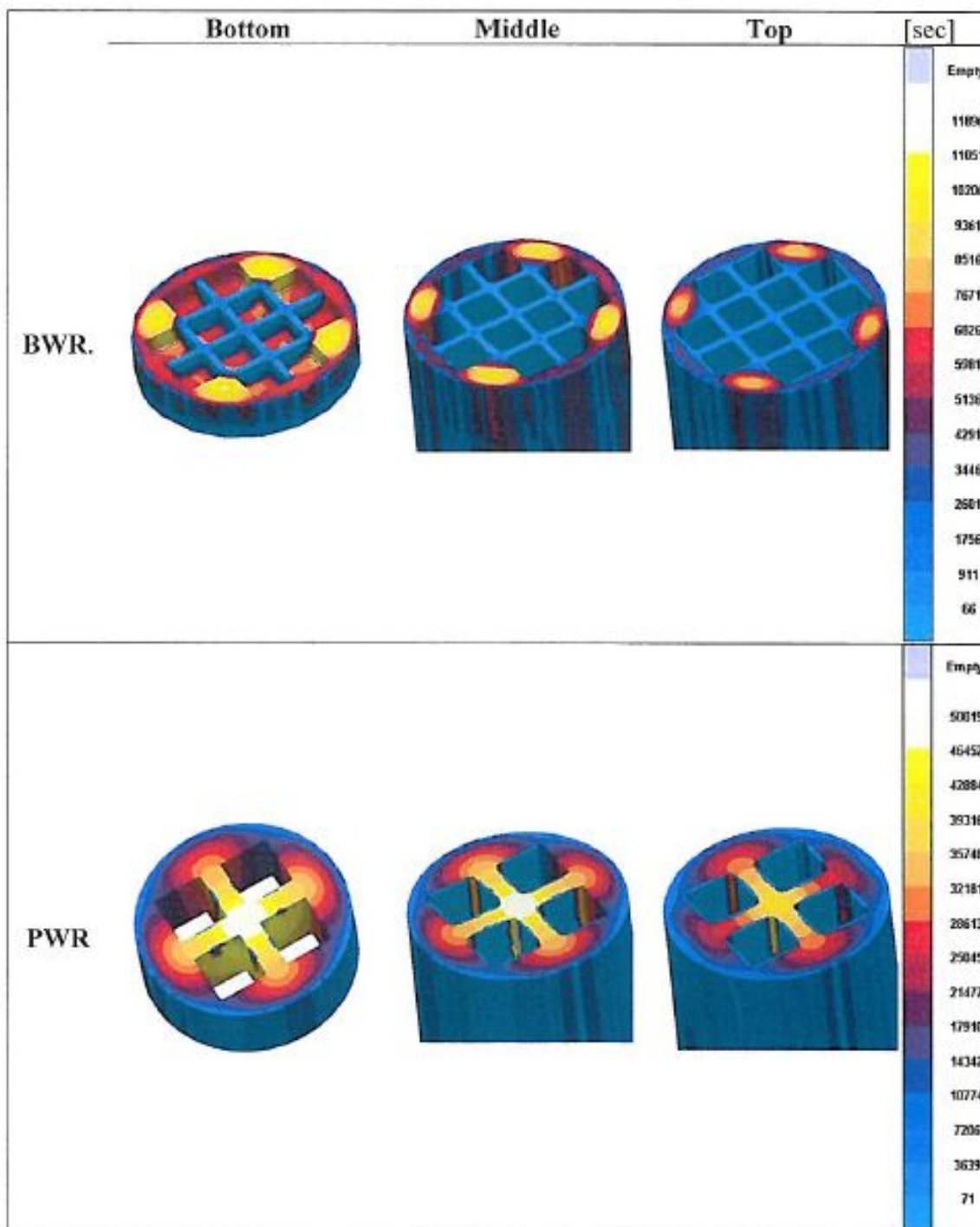
4.1 Riskområden för defekter

I ett större gjutgods som segjärnsinsatsen varierar stelningstiden. I de områden som har långsammast stelningsförlopp ökar risken generellt för segringar av legerings- och spårelement vilket kan leda till strukturavvikelser. Även risken för bildning av krympdefekter orsakad av brist på smälta för att kompensera materialets stelningskrympning ökar i dessa områden. Med hjälp av gjutsimuleringar vid Swerea Swecast har segjärnets stelningsförlopp vid fallgjutning av insats predikerats "Casting simulation of BWR and PWR nuclear waste canister inserts" (SKBdoc 1346466).

Simuleringsresultaten visar att stelningstiden vid gjutningar av BWR-insatser är jämn i axiell ledd, se figur 4-1. Det innebär att stelningsförloppet är likvärdigt längs insatsen och att det därmed kan förväntas likartad struktur och mekaniska egenskaper i insatsens botten, mitt och topp. PWR-insatser stelnar långsammare jämfört med BWR-insatser och har områden i botten och toppen som stelnar snabbare än resten av insatsen. Figur 4-2 visar simulerad stelningstid i radiell ledd. Områden med längst stelningstid indikerar högre risk för vissa typer av defektbildning; främst sugningar, sugningsporer och defekt grafit. Observera att simuleringarna visar på områden med förhöjd risk för defektbildning men att defekter kan förekomma även i andra delar av insatsen.



Figur 4-1. Stelningstidens variation i axiell ledd för BWR (vänster) respektive PWR (höger). Stelningstiden indikeras med färgskalan blått-rött-gult-vitt där blå färg betyder kortast tid. Observera att färgskalans absolutvärden för stelningstid omfattar intervallet 66-11896 sekunder för BWR-insatsen (vänster) och intervallet 73-54019 sekunder för PWR-insatsen (höger) (SKBdoc 1346466).



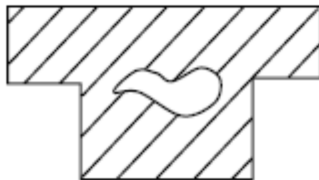
Figur 4-2. Gul/vit färg indikerar områden som stelnsar sist och därmed har ökad risk för sämre materialegenskaper och vissa defekter. Tvärsnitten är uttagna i de axiella positionerna botten, mitten och toppen. Observera att färgskalans absolutvärden för stelningstid omfattar intervallet 66 - 11896 sekunder för BWR-insatsen (ovan) och intervallet 71 - 50019 sekunder för PWR-insatsen (under) (SKBdoc 1346466).

5 Defektbeskrivningar och brottmekanisk klassificering

I rapporten ”Tillverkning av Kapselkomponenter” (SKBdoc 1175208) anges ett antal gjutdefekter i bilaga 3 som har bedömts vara relevanta för insatsen. Av dessa defekter återges i föreliggande dokument endast de makroskopiska defekterna, se figur 5-1 till 5-5 samt figur 5-7 till 5-8. Mikroskopiska defekter så som mikroporositet och defekt grafit behandlas inte i föreliggande dokument eftersom de utgör strukturavvikelser vilka detekteras med *förstörande* provningsmetoder (dragprovning, metallografi). Den tidigare identifierade defekttypen ”Elefanthud” har utelämnats eftersom den är ytlig och avverkas vid maskinbearbetning av insatsen. Tidigare defektbenämning ”Ytblåsa” benämns i föreliggande dokument som gasblåsa. Nedan följer beskrivningar av defekter med tillhörande schematiska skisser enligt (SKBdoc 1175208).

5.1 Sugningar

Sugningar utgör hålrum i godset till följd av otillräcklig kompensation för smältans stelningskrämpning. I de fall inre sugning och sugningsporer förekommer i insatsen så återfinns de sannolikt i sist stelnade områden i enlighet med gjutsimuleringar. De har en oregelbunden form och är godtyckligt orienterade. Se figur 5-1 och figur 5-2.

<p>En inre sugning utgörs av en sammanhängande oregelbunden hålighet i gjutgodset. Hålighetens väggar uppvisar ofta dendriter. Orsaken till sugningens uppkomst beror på brist av lätt flytande matningsmetall och mest sannolik vid godsanhopningar.</p> <p>Inre sugningar har inte påträffats i insatser.</p> <p>Preliminärt klassificeras inre sugning som en volymetrisk defekt.</p>	 <p>Inre sugning (SKBdoc 1175208)</p>
---	--

Figur 5-1. Visualisering av defekttypen inre sugning.

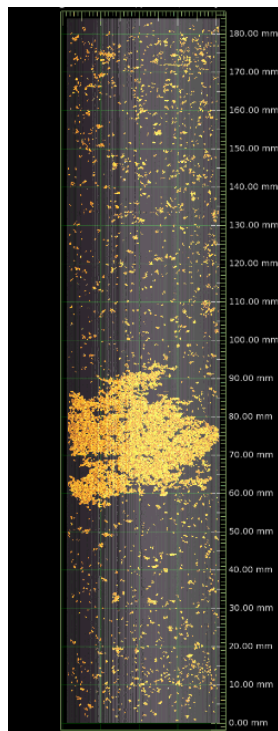
Sugningsporer utgörs av håligheter som ofta är belägna i godsanhopningar och är, till skillnad från mikrosugningar, av en storlek som gör de möjliga att se med blotta ögat. Sugningsporerna är enskilt mindre än en inre sugning men bildas vanligen i form av ansamlingar. Kaviteterna visar dendriter.

I PWR-insatser har sugningsporer påträffats mellan kanälrören. Efter insatta åtgärder för att förebygga kondens har fenomenet inte observerats.

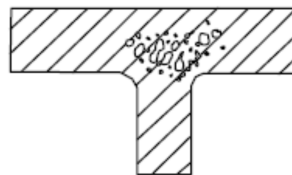
Mindre sugningsporer har påträffats i BWR-insatser i samverkan med fukt orsakad av processens genomförande.

Korrelationen mellan brottförlängning och total defektarea på brottytan har utretts ingående i ”Defect distributions for BWR- and PWR insert material” (SKBdoc 1417759).

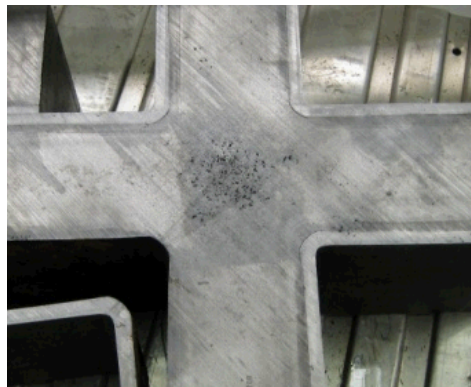
Porositet kan inte anses vara styrande för brottet och inte agera som sprickliknande defekter och klassificeras därmed som volymetrisk defekt.



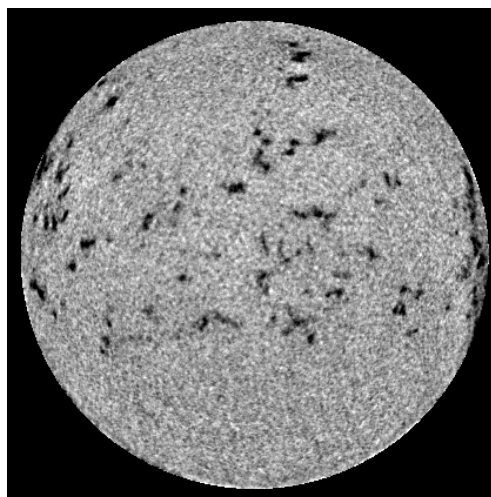
(SKBdoc 1352906)



Sugningsporer (SKBdoc 1175208)



I ett tvärsnitt från PWR-insats IP17 påträffades sugningsporer i centrum av insatsen.



Tomografibilden till vänster visar en ansamling av porer i en provstav (diameter 40mm) uttagen från BWR insats I57. Bilden ovan visar ett tvärsnitt från samma provstav. De större svarta punkterna är porer och de mindre är grafitnoduler (SKBdoc 1352906)

Figur 5-2. Visualisering av defektypen sugningsporer.

Vid undersökningarna av material med sugningsporer ”Investigation report, Examination No 20470” (SKBdoc 1358335) framgår att porhalten påverkar brottförlängningen hos provstavar. Inverkan ses redan vid en andel porer i brottytan på cirka 1 % och vid cirka 10 % ytandel porer i brottytan sjunker brottförlängningen till 6 %. Eftersom brottytan är oregelbunden och följer den svagaste strukturen innebär en direktöversättning av areaandel till volymsandel troligtvis en överskattskattning av volymsandelen i området för det svagaste snittet hos provstaven. I litteraturen finns studier av stålgljutgods där porernas inverkan på de mekaniska egenskaperna undersökts. Porer med olika form och halt har studerats via modellering och experiment (Hardin och Beckerman 2006). Resultaten visar att kopplat till porositet sjunker elasticitetsmodulen E vid en porhalt på 50 % till nära noll för den minst gynnsamma typen av porer. Vid belastning kan i en porös metall även förväntas en sänkning av sträckgränsen i såväl drag som kompression (Hardin och Beckerman 2006).

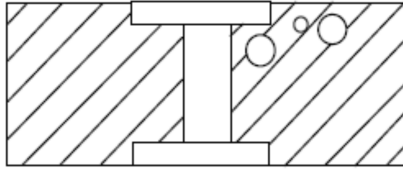
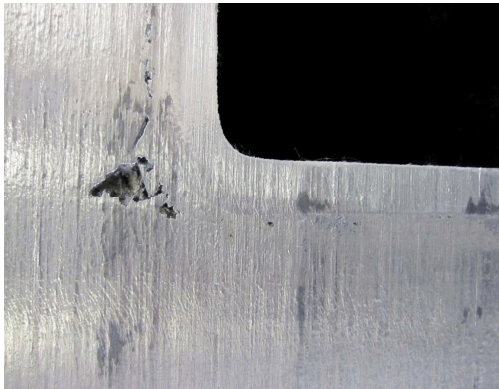
Utifrån ovanstående resonemang kan följande slutsatser dras:

1. För att upprätthålla materialkravet på brottöjning får inte porhalten överstiga 10 %.
2. Det porösa materialets E -modul sjunker med ökande porhalt för stålgljutgods, vid 10 % porhalt sjunker E -modulen med 25 %. Segjärn kan förväntas bete sig på liknande sätt.
3. Vid en porhalt på 50 % uppträder porositeten som en volymetrisk inneslutning

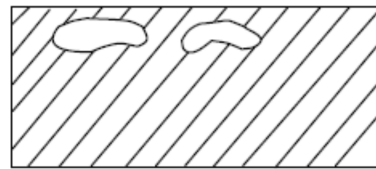

Erfarenheten är att förhöjd porhalt kan uppstå lokalt men inte globalt. Den mekaniska påverkan är olika beroende på om det är drag- eller kompressiva laster. De båda lastfall som är styrande för insatsen, isostatlastfallet och skjuvlastfallet ger olika belastningar. Vid isostatlastfallet är lasterna i huvudsak kompressiva vilket medför att volymetriska defekter är styrande. Kraven för volymetriska defekter ges av tabell 6-1 för BWR och tabell 6-2 för PWR vilket motsvarar en porhalt $\geq 50\%$. Vid skjuvlastfallet är huvudspänningen axiellt riktad i ytan och brottmoden för porositet vid dragpåkänning är plastisk kollaps. I rapporten ”Modelling and analysis of canister with insert void defects for earthquake induced rock shear” (SKBdoc 1427299) redogörs för simuleringar av en insats med postulerade volymetriska defekter vid skjuvlastfallet. Ingen signifikant påverkan på det omgivande spänningsfältet eller töjningsfältet kan påvisas.

5.2 Gasblåsor

Gas kan skiljas ut i smältan och vid ogynnsamma förhållanden bli innesluten i gjutgodset i form av blåsor under stelningen. Gasens ursprung finns vanligen i sandformens bindemedel eller som fukt i gjutformen. Gasblåsor har en rund eller oregelbunden form med godtycklig orientering. Se figur 5-3 och figur 5-4.

<p>Kärnstödsblåsor anges till storlek 2-20 mm. Dessa bildas vid gasutfällning i smältan i anslutning till någon kärna i gjutformen. SKB använder benämningen kärnstödsblåsa för defekter i direkt anslutning till kanalrören, vilka sannolikt orsakats av gasutfällning till följd av kondens på kassetten. Förutom gas kan även föroreningar och oxider på stålkastettens yta orsaka defekter i anslutning till kanalrören.</p> <p>Kärnstödsblåsor har påträffats i BWR- och PWR-insatser.</p> <p>Vid skadetålighetsanalyser klassificeras en kärnstödsblåsa preliminärt som en volymetrisk defekt men vidare studier krävs för en säkrare karakterisering.</p>	 <p>Kärnstödsblåsa (SKBdoc 1175208)</p>  <p>Exempel på defekt vid kanalrör i PWR-insats IP25</p>
---	---

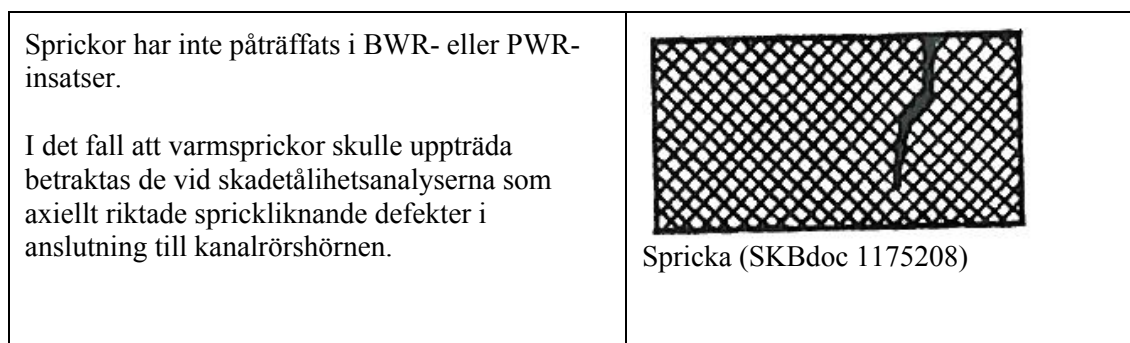
Figur 5-3. Visualisering av defektypen kärnstödsblåsa.

<p>En gasblåsa utgörs ofta av en 1–100 mm stor blåsa, som kan vara öppen eller täckt. Blåsan har ofta släta väggar utan beläggningar. Blåsor kan uppträda under gjutstyckets yta (ytblåsa) men även jämnt fördelade i andra delar av gjutstycket. Blåsorna orsakas av instängd gas.</p> <p>Gasblåsor har påträffats i BWR- och PWR-insatser.</p> <p>Vid skadetålighetsanalyserna klassificeras gasblåsor som volymetriska defekter.</p>	 <p>Ytblåsa (SKBdoc 1175208)</p>  <p>Exempel på gasblåsa i BWR-insats I66</p>
--	---

Figur 5-4. Visualisering av defektypen gasblåsa.

5.3 Sprickor

Bildning av varmsprickor (hot tearing) kan uppstå under götets stelnings- eller svalningsfas där riskområdet anges som de yttre kanalrörshörnen i BWR insatsen ”Rapport om sprickor i segjärnsinsats PWR, BWR” (SKBdoc 1219803), se även figur 5-5. För att så kallade kallsprickor ska kunna uppstå i segjärn krävs kraftig yttre åverkan, dock sjunker slagsegheten hos segjärn med temperaturen vilket innebär att fenomenet behöver undersökas vidare med tanke på hantering vid låga temperaturer. Förekomst av varm- eller kallsprickor i segjärn anses erfarenhetsmässigt vara mycket ovanligt enligt ”Rapport om sprickor i segjärnsinsats PWR, BWR” (SKBdoc 1219803).



Figur 5-5. Visualisering av defektypen spricka.

5.4 Inneslutningar

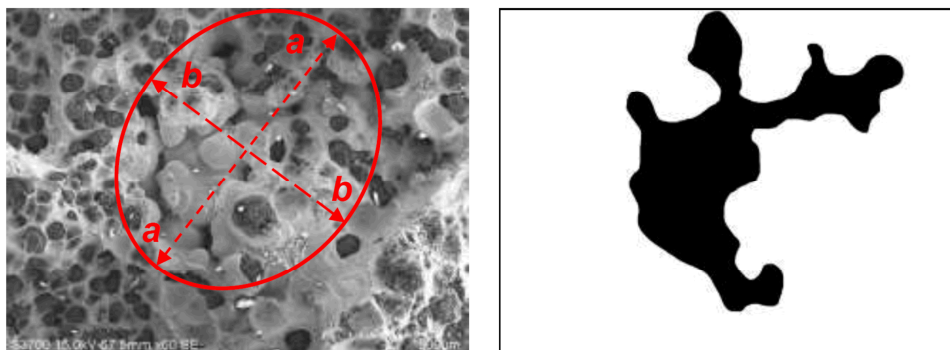
Inneslutningar utgörs vanligen av sandkorn eller sandagglomerat och slag. Se figur 5-7 och figur 5-8. I segjärn förekommer en speciell slagtyp som kallas dross. Den består av magnesium-svavel-silikater och är en biverkan från den så kallade segjärnsbehandlingen där legeringsämnen tillsätts för att åstadkomma grafitnodulerna. Drossbildning är inte direkt kopplad till stelningstid men väl till exponering av smältan för syre (Gagné et al. 2009).

Dross har visats agera som sprickliknande defekter och det har visats vid dragprovning att det finns koppling mellan arean dross i brottytan och provstavens förlängningsvärden. Samma princip för kartläggning har använts för både BWR- och PWR-insatser enligt sammanställning i ”Defect distributions for BWR- and PWR-insert material” (SKBdoc 1417759). Korrelationen mellan brottförlängning och total defektarea i brottytan är låg men betydligt högre för enbart arean av dross.

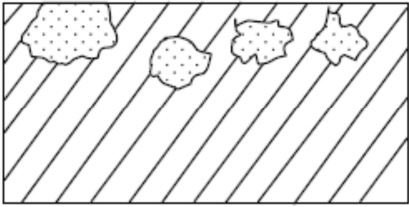
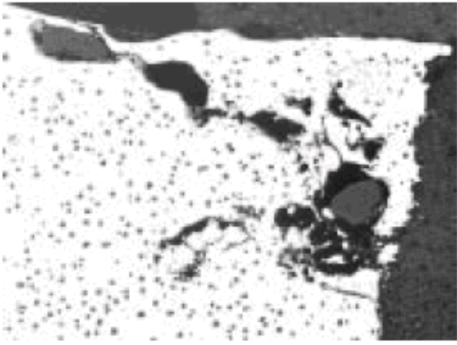
SKB:s undersökningar visar att dross förekommer i hela insatsen men bör ha en tendens att flyta uppåt till följd av lägre densitet jämfört med smältan. Kartläggningar av förekomst av dross har genomförts genom omfattande fraktografiska studier av brottytorna hos dragprovstavar från BWR-insatser I53-I57 och PWR-insatserna IP23-IP25, se ”Defect distributions for BWR- and PWR insert material” (SKBdoc 1417759).

Funna slagger har storleksuppskattats på två sätt dels genom mätning i svepelektronmikroskop och dels genom bildanalys och anpassning av en ellips till defektens kontur varvid defekternas storlek kan anges även som storaxel a och lillaxel b hos ellipsen, se exempel figur 5-6.

Förekomsten och storleken hos dross har minskat över tid vilket åskådligörs i SKBdoc 1417759. Medelstorleken för dross har minskat från 1,2 mm för I53-I57 till 0,8 mm för IP23-IP25.



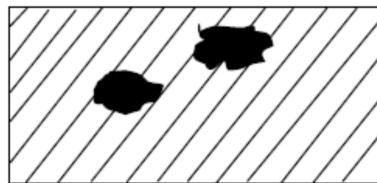
Figur 5-6. Exempel på ellips med dess axlar som anpassats till en porositet visas i den vänstra bilden, till höger visas porositeten från bildanalysen som ligger till grund för ellipsanpassningen.

<p>Sandinneslutning eller andra partiklar från formen kan ligga inbäddade på ytan eller en bit in i godset. Det kan orsakas av att packad sand eller andra partiklar har lossat från form eller gjutsystem vid montering eller påfyllnad av smälta. Enstaka sandkorn har påträffats i BWR- respektive PWR-insatser men dock i ett mycket tidigt skede av utvecklingsarbetet.</p> <p>Det återstår att avgöra om sandinneslutningarna agerar sprickliknande eller ej med avseende på segjärnets skadetålighet.</p>	 <p>Sandinneslutning (SKBdoc 1175208)</p>  <p>Mikrobild av ingjutet sandkorn (ej från insats)</p>
---	---

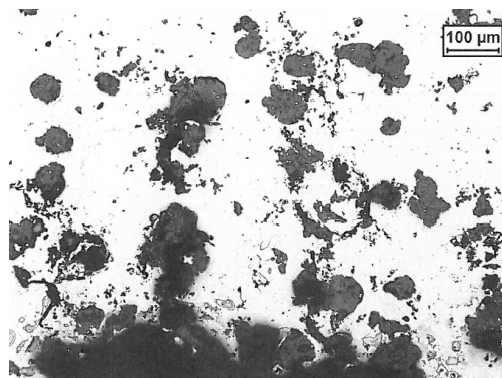
Figur 5-7. Visualisering av defektypen sandinneslutning.

En **slagginneslutning** i segjärn utgörs ofta av en mörk eller svart slaggpartikel i storlek ca 1 mm, som kan visa sig i brottytor eller i bearbetade ytor i segjärn. Den näraliggande grafiten är ofta felaktig (degenererad). Slaggen utgörs ibland av hinnor av magnesiumoxid. Slagginneslutningar har påträffats i insatserna.

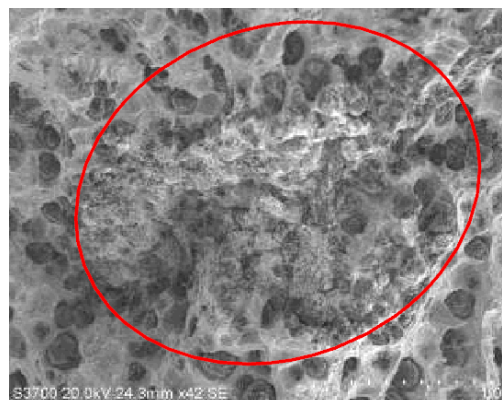
Vid skadetålighetsanalyserna klassificeras slagger som sprickliknande defekter.



Slagginneslutning i segjärn (SKBdoc 1175208)



Struktur med inslag av slagg i PWR-insats IP22T.

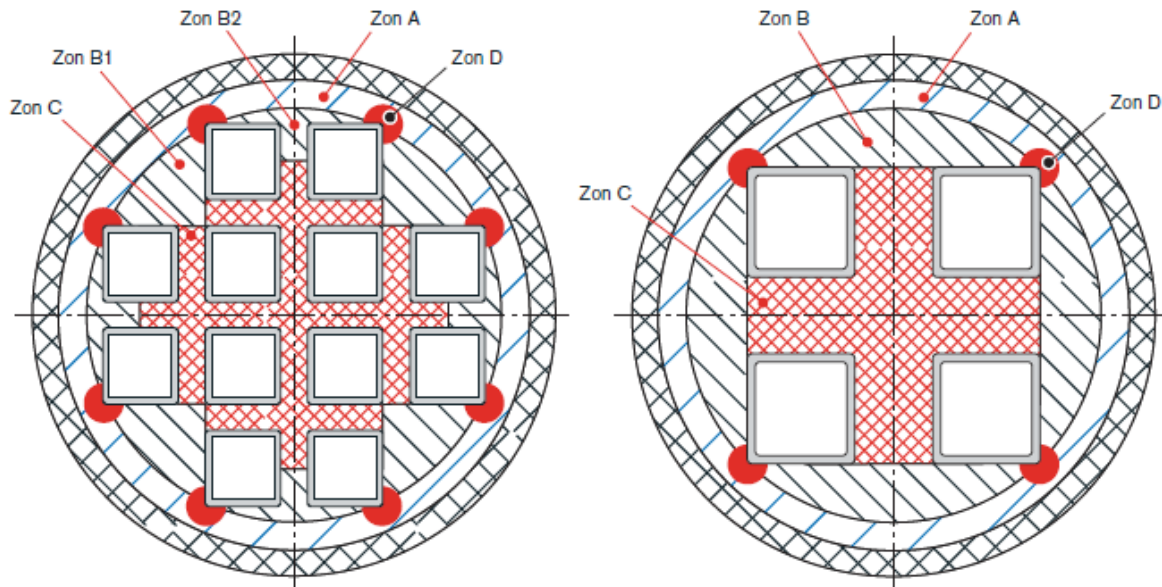


Slagg i brottyta från provstav ur BWR-insats I54M.

Figur 5-8. Visualisering av defektypen slagginneslutning.

6 Acceptanskriterier

Acceptanskriterier är baserade på acceptabel defektstorlek för postulerade defekter. Givet den valda preliminära brottmekaniska klassificeringen (sprickliknande/volymetrisk) och riskområden för olika defekter har acceptanskriterier angivits. Angivelse av förväntat läge för respektive defekt följer zonindelning enligt figur 6-1 (Raiko et al. 2010).



Figur 6-1. Zonindelning enligt figur 6-1 i Raiko et al.(2010).

6.1 Acceptanskriterier för volymetriska och sprickliknande defekter

Acceptanskriterier för volymetriska defekter ges av Dillström et al. (2010) för isostatiska trycklaster. Tabell 6-1 och tabell 6-2 baseras på Dillström et al. (2010) där beräkningarna baseras på isostatlast 45 MPa. Acceptanskriterierna har härletts utifrån tvådimensionella beräkningar i Dillström et al. (2010) varför den axiella utbredningen kan tillåtas vara hela insatsens längd. Beräkningar har visat på att betydligt större defekter kan tillåtas och att acceptanskriterierna därmed kan komma att ändras.

För skjuvlastfallet har även kontrollberäkningar med volymetriska defekter i zon A och D genomförts, se ”Modelling and analysis of canister with insert void defects for earthquake induced rock shear” (SKBdoc 1427299).

Tabell 6-1. Acceptanskriterier för volymetriska tillverkningsdefekter, BWR insatser.

(Zonindelning enligt figur 6-1)

Defekt	Riskområde					Acceptanskriterier diameter (mm)				
	A	B1	B2	C	D	A	B1	B2	C	D
Inre sugning		x				40	60 ¹⁾	20 ¹⁾	20 ¹⁾	20
Område med sugningsporer	x	x	x	x	x					
Kärnstödsblåsa		x	x	x	x					
Gasblåsor	x	x	x	x	x					

¹⁾ Kravet endast verifierat för isostatiska laster

Tabell 6-2. Acceptanskriterier för volymetriska tillverkningsdefekter, PWR insatser.

(Zonindelning enligt figur 6-1)

Defekt	Riskområde				Acceptanskriterier diameter (mm)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Inre sugning		x			80	100 ¹⁾	100 ¹⁾	20
Område med sugningsporer	x	x	x	x				
Kärnstödsblåsa		x	x	x				
Gasblåsor	x	x	x	x				

¹⁾ Kravet endast verifierat för isostatiska laster

Acceptanskriterier för axiella sprickor i tabell 6-3 och tabell 6-4 ges av Dillström et al. (2010) som baseras på isostatisk trycklast.

Acceptanskriterierna för dross (slag) i tabell 6-3 orienterade i omkretsled baseras på Dillström och Bolinder (2010) där beräkningarna utgår från skjuvlastfallet med 5 cm skjuvampplitud där skjuvplanet träffar kapseln vinkelrätt vid $\frac{3}{4}$ av kapselns längd räknat från dess botten.

Acceptanskriterierna för dross (slag) i tabell 6-4 baseras på ”Analysis of PWR canister inserts using data acquired from PWR material” (SKBdoc 1288288) där beräkningarna utgår från skjuvlastfallet med 5 cm skjuvampplitud där skjuvplanet träffar kapseln vinkelrätt vid $\frac{3}{4}$ av kapselns längd räknat från dess botten.

I tabell 6-3 respektive 6-4 anges för vissa defekter att dessa kan vara större än (>) det angivna värdet i tabellen. Detta betyder att då >-tecken används så har inte beräkningar gjorts på större defekter och att detta troligtvis innebär att större defekter kan tillåtas.

Tabell 6-3. Acceptanskriterier för sprickliknande defekter i axiell- och omkretsled, BWR insatser

(Zonindelning enligt figur 6-1)

Defekt	Riskområde					Riktning	Acceptanskriterier halvelliptisk form djup/längd mm ¹⁾					
	A	B1	B2	C	D		A 0-2 mm från ytan	A >2 mm från ytan	B1	B2	C	D
Dross (slag)	x	x	x	x	x	Axiell	37 222	37 222	65 393	50 300	24 144	32 196
Varm- spricka ¹⁾					x	Axiell	37 222	37 222	65 393	50 300	24 144	32 196
							Acceptanskriterier elliptisk form djup/längd (mm) ¹⁾					
Dross (slag)	x	x	x	x	x	Omkrets- led	4,5 ²⁾	>10	>10	>10	>10	>10
							27	>60	>60	>60	>60	>60
							Acceptanskriterier cirkelformad defekt djup/längd (mm)					
							16,4	>10	>10	>10	>10	>10

Tabell 6-4. Acceptanskriterier för sprickliknande defekter i axiell- och omkretsled, PWR insatser

(Zonindelning enligt figur 6-1)

Defekt	Riskområde				Riktning	Acceptanskriterier halvelliptisk form djup/längd (mm) ¹⁾				
	A	B	C	D		A 0-2 mm från ytan	A >2 mm från ytan	B	C	D
Dross (slag)	x	x	x	x	Axiell	53 318	53 318	112 672	104 624	31 186
Varm- spricka ¹⁾				x	Axiell	53 318	53 318	112 672	104 624	31 186
						Acceptanskriterier elliptisk form djup/längd (mm) ¹⁾				
Dross (slag)	x	x	x	x	Omkrets- led	4,1 ²⁾	>10	>10	Beräkningar saknas	>10
						24,6	>60	>60		>60
						Acceptanskriterier cirkelformad defekt djup/längd (mm)				
						15	>10	>10 ⁴⁾		>10

1) Djup/längd = 1/6

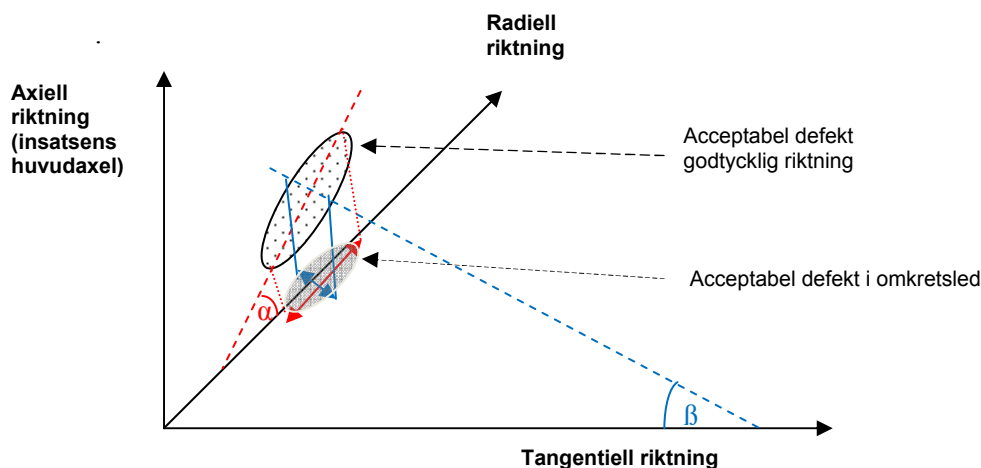
2) Halvelliptisk ytdefekt, djup/längd = 1/6

3) Halvcirkulär ytdefekt

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

6.2 Acceptanskriterier för sprickliknande defekter med godtycklig riktning.

Lutningen mot omkretsplanet hos sprickliknande defekter påverkar den acceptabla defektstorleken. Styrande för axiella riktade sprickliknande defekter är isostatlastfallet och defekttypen är postulerade varmsprickor i kanalrörshörnen eller dross (slag). Den sprickliknande defekten dross bedöms kunna finnas i godtycklig riktning.



Figur 6-2. Princip för att bestämma acceptabel defektstorlek hos vinklade defekter

Den acceptabla defektens mått enligt tabell 6-3 respektive tabell 6-4 (angiven som utsträckningen i omkretsled) ska multipliceras med uttrycket

$$(1/\cos(\alpha)) \cdot (1/\cos(\beta))$$

för att erhålla den acceptabla defektstorleken i radiellt/tangentiellt plan för den vinklade defekten, där α och β anger lutningsvinklarna hos defektens huvudplan enligt ”Summary of important characteristic parameters for the insert, based on performed strength and damage tolerance analyses” (SKBdoc 1288292). Kriteriet kan tillämpas för vinklar under 60 grader. Vid större vinklar växer den beräknade acceptabla storleken snabbt vilket gör att randvillkoren kan ändras.

6.3 Närliggande defekter och ytnära defekter

För sprickliknande defekter i samma plan som befinner sig nära varandra tillämpas Appendix A Defect characterization, Figure A1 i Dillström et al. (2008). Även definitionerna som anges för bestämning av ytnära defekters acceptabla storlek tillämpas.

Hur närliggande defekter som ligger i olika plan och riktning ska hanteras framgår inte av Dillström et al. (2008) och frågan är inte vidare utredd av SKB.

Avseende samverkan mellan volymetriska- och sprickliknande defekter som inte hanteras i Dillström et al. (2008) har Hernelind i kompletterande beräkningar (SKBdoc 1427299) visat att spänningsfältet runt ytnära volymetriska defekt inte påverkas mer än ytterst lokalt. För tryckklaster visar kapitel 7.4 i Dillström et al. (2010) att inre volymetriska defekter ger en mycket liten påverkan på tryckhållfastheten.

7 Krav som ställs vid inspektion med OFP

Vid tillämpning av de deterministiska acceptanskriterierna vid inspektion gäller nedanstående.

7.1 Krav på detektering

Den acceptabla defektstorleken i de olika zonerna i insatsen ska kunna detekteras. För defekter som inte kan avgränsas till en zon tillämpas zonen med det strängaste kravet för acceptabel defektstorlek.

7.2 Krav på lägesbestämning

Defekters läge i relation till de definierade zonerna i insatsen ska kunna fastställas så att adekvat acceptanskriterium tillämpas.

7.3 Krav på karakterisering

Det ska kunna säkerställas att adekvat acceptanskriterium för defekten tillämpas. Närliggande defekter hanteras enligt figur A1 i appendix A, Dillström et al. (2008).

7.4 Krav på storleksbestämning

Det ska säkerställas att tillämpat acceptanskriterium för defekten kan uppfyllas.

8 Krav i områden med komplicerad geometri

Av tillverkningsmässiga skäl finns det områden med mer komplicerad geometri i BWR- och PWR-insatsen.

8.1 Bottenplattan och området på toppens tvärsnitt

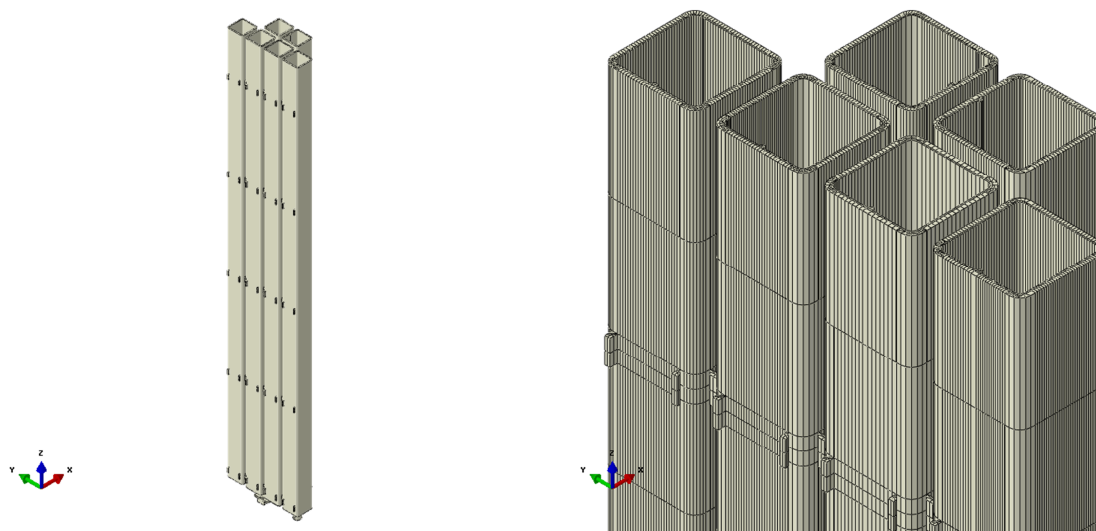
Den homogena bottenplattan av BWR- och PWR-insatsen och området på toppens tvärsnitt i änden på insatsen omfattas ej av de krav som anges i detta dokument. Detta motiveras av att ändarna på insatsen är lågt påkända vilket visas av "Global simulation of copper canister-final deposition" (SKBdoc 1339902) och "Detailed models for PWR- and BWR-canisters for earthquake induced rock shearing" (SKBdoc 1415152) för skjuvlastfallet.

Beräkningarna för isostatlastfallet som genomförts i två dimensioner och som sedan jämförts med tredimensionella beräkningar i Dillström et al. (2010), har visat på stor marginal med avseende på defekter även för detta lastfall.

8.2 Stagplåtar

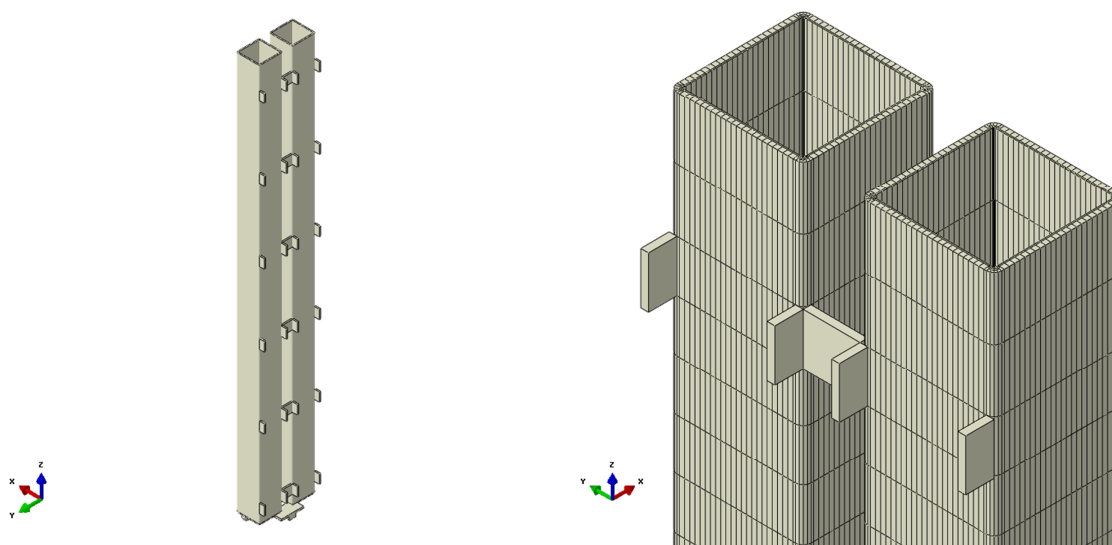
I de gjutna BWR- och PWR-insatserna finns det ett antal stagplåtar fastsvetsade mot kanalrören och ingjutna tillsammans med dessa. Det egentliga syftet med stagplåtarna är att fixera kanalrören då kassetten tillverkas samt att stabilisera konstruktionen under gjutningen men stagplåtarna bidrar även till BWR- och PWR-insatsens mekaniska hållfasthet vilket visas i "Detailed models for PWR- and BWR-canisters for earthquake induced rock shearing" (SKBdoc 1415152).

I BWR-insatsen finns dessa stagplåtar på fem nivåer i axiell led, se figur 8-1. Stagplåtarna har en höjd på 50 mm, en bredd på 30 mm (motsvarande kanalrörsavståndet), och en tjocklek på 10 mm.



Figur 8-1. Kassetten utförande i BWR- insatsen där stagplåtarnas position i axiell led framgår (vänstra figuren) och hur de är konfigurerade (högra figuren).

I PWR-insatsen finns dessa stagplåtar på sex nivåer i axiell led, se figur 8-2. Stagplåtarna har en höjd på 100 mm, en bredd på c:a 110 mm och en tjocklek på 15 mm.



Figur 8-2. Kassetten utförande i PWR- insatsen där stagplåtarnas position i axiell led framgår (vänstra figuren) och hur de är konfigurerade (högra figuren).

Vid tryckbelastningar visas i kapitel 6 i Dillström et al. (2010) att en fiktiv volymetrisk defekt i BWR-insatsen med en höjd på 410 mm och som omfattar hela området innanför kanalrören (zon C enligt figur 6-1), är acceptabel. Därav följer att en volymetrisk defekt motsvarande höjden av stagplåtarna (50 mm) är acceptabel med stor marginal. BWR-insatsens tolerans för volymetriska defekter vid skjuvbelastning i zon C är inte utredd och därmed kan det inte anges några specificerade krav i denna zon med avseende på skjuvlastfallet. I zon C finns samma påkänningsnivå vid området för stagplåtarna som i omgivande områden utanför stagplåtarna och därför gäller kraven mellan stagplåtarna med avseende på sprickliknande defekter enligt tabell 6-3.

I PWR- insatsen bildar stagplåtarna tillsammans med kanalrören ingjutna avgränsade firsidiga områden. För isostalastfallet kan enligt tabell 6-2 en volymetrisk defekt med diametern 100 mm accepteras i zon C. I likhet med BWR-insatsen har inte PWR-insatsen utretts med avseende på

tolerans för volymetriska defekter vid skjuvbelastning i zon C och därmed kan det inte anges några specificerade krav i zon C. I zon C finns samma påkänningsnivå vid området för stagplåtarna som i omgivande områden utanför stagplåtarna och därför gäller kraven mellan stagplåtarna med avseende på sprickliknande defekter enligt tabell 6-4.

Referenser

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 P, Bergman M, Brickstad B, Zang W, Sattari-Far I, Andersson P, Sund G, Dahlberg L, Nilsson F, 2008. A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components. Research Report 2008:01, Strålsäkerhetsmyndigheten.

Dillström P, Alverlind P, Andersson M, 2010. Framtagning av acceptanskriterier samt skadetålighetsanalyser av segjärnsinsatsen. SKB R-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gagné M, Paquin M-P, Cabanne P-M, 2009. Dross in ductile iron: source, formation and explanation. Foundry Trade Journal, November 2009, 276–280.

Hardin R A, Beckerman C, 2006. Simulation of the mechanical performance of cast steel with porosity: static properties. In Proceedings of the 60th SFSA Technical and operating conference. Chicago, IL: Steel Founders' Society of America, paper no. 4.3.

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

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

SSM, 2012. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvar av använt kärnbränsle och kärnavfall – kontroll och provning för fastställande av kapselns initialtillstånd. SSM2011-2426-59, Strålsäkerhetsmyndigheten.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare
1175208 ver 5.0	Tillverkning av kapselkomponenter	SKB, 2011
1219803 ver 1.0	Rapport om sprickor i segjärnsinsats PWR, BWR	SKB, 2009
1288288 ver 2.0	Analysis of PWR canister inserts using data acquired from PWR material	Inspecta Technology, 2014
1288292 ver 1.0	Summary of important characteristic parameters for the BWR- and PWR-insert, based on performed strength and damage tolerance analyses	Inspecta Technology, 2014
1339902 ver 1.0	Global simulation of copper canister – final deposition	SKB, 2014
1346466 ver 1.0	Casting simulation of BWR and PWR nuclear waste canister inserts	Swerea Swecast AB, 2012
1352906 ver 2.0	High-energy computed tomography investigation of large tensile test specimens	BAM, 2012
1358335 ver 3.0	Investigation report 20470	Swerea Swecast AB, 2014
1415152 ver 2.0	Detailed models for PWR- and BWR-canisters for earthquake induced rock shearing	SKB, 2014
1417759 ver 1.0	Defect distributions for BWR- and PWR insert material	Inspecta Technology, 2014
1427299 ver 1.0	Modelling and analysis of canister with insert void defects for earthquake induced rock shear	SKB, 2014