

INSPECTA

P M

SKB

PM Probabilistisk analys av skjuvlastfallet

PM nr: 50011100-1

Revision nr: 3

PM nr: 50011100-1

Revision nr: 3

Datum 2014-02-19	Vårt projektnr 50011100
Godkänd av Keivan Ashhami	Avdelning Inspecta Technology AB
Kund/Uppdragsgivare SKB	Kundens referens Mikael Jonsson
<p>Sammanfattning</p> <p>SKB har tidigare utfört probabilistiska analyser av insatsen för isostatlastfallet. Både dessa och motsvarande deterministiska analyser visar att insatsen är mycket defekttålig med avseende på isostatlastfallet. Deterministiska analyser av skjuvlastfallet har däremot visat att den acceptabla defektstorleken för detta lastfall är mycket mindre jämfört med isostatlastfallet. Särskilt är inverkan av ytnära sprickliknande defekter påtaglig för skjuvlastfallet, något som inte alls är fallet för det vanliga isostatlastfallet. I den deterministiska analysen av skjuvlastfallet har det införts ett flertal pessimistiska antaganden som sammantaget troligen bidrar till de små acceptabla defektstorlekarna.</p> <p>På samma sätt som genomfördes för isostatlastfallet är det därför av stort intresse att värdera ovan nämnda konservativa antaganden via en probabilistisk analys av insatsen för skjuvlastfallet. I denna rapport beskrivs en förstudie som syftar till att få en bra belysning av de parametrar som påverkar analysresultatet. Vidare beskrivs en förenklad analytisk modell (som beskriver insatsen/skjuvlastfallet) som kan användas vid de kommande probabilistiska analyserna.</p> <p>De parametrar som beaktas i denna förstudie är; insatsens brottseghet, sträck- och brottgräns samt brottförlängning, defektfördelning för sprickliknande defekter, sannolikheten att en defekt hittas med oförstörande provning, typ av bentonit och dess densitet, skjuvningens storlek, hastighet samt skjuvplanets vinkel mot insatsen samt dess position i axiell led och isens tjocklek.</p>	
Rapporttitel PM Probabilistisk analys av skjuvlastfallet	Ämnesgrupp
	Indexord Förstudie, probabilistisk analys, skjuvlastfallet, insatsen.
Utfört av Peter Dillström	Distribution <input checked="" type="checkbox"/> Ingen distribution utan tillåtelse från kunden eller ansvarig inom Inspecta Technology AB. <input type="checkbox"/> Begränsad distribution inom Inspecta Technology AB. <input type="checkbox"/> Fri distribution.
Granskat av Jens Gunnars	
Datum för denna rev	

<i>Innehållsförteckning</i>		<i>Sida</i>
1	BAKGRUND OCH SYFTE	4
2	FÖRUTSÄTTNINGAR VID EN PROBABILISTISK ANALYS AV SKJUVLASTFALLET	4
3	GENOMGÅNG AV PARAMETRAR	5
3.1	Insatsens brottseghet	5
3.2	Insatsens sträck- och brottgräns	6
3.3	Insatsens brottförlängning	7
3.4	Defektfördelning för sprickliknande defekter	8
3.5	Sannolikheten att man hittar en defekt med oförstörande provning	8
3.6	Typ av bentonit	8
3.7	Bentonitens densitet	9
3.8	Skjuvningens storlek	9
3.9	Skjuvhastighet	9
3.10	Skjuvplanets vinkel/vinklar mot insatsen	9
3.11	Skjuvplanets position i axiell led	10
3.12	Isens tjocklek	10
4	PROBABILISTISK ANALYS AV SKJUVLASTFALLET	11
4.1	Definition av styrande/kritiska händelser	11
4.2	Bakomliggande teori	12
4.3	Steg för att genomföra en probabilistisk analys av skjuvlastfallet	13
4.4	Förslag på parameterområde för de globala FE-analyserna	14
5	FÖRSLAG PÅ KÄNSLIGHETSANALYSER	15
6	REFERENSER	16
7	REVISIONSFÖRTECKNING	17

1 BAKGRUND OCH SYFTE

SKB har tidigare utfört probabilistiska analyser av insatsen för isostatlastfallet [1, 2]. Både dessa och motsvarande deterministiska analyser [3] visar att insatsen är mycket defekttålig med avseende på isostatlastfallet. Däremot så har deterministiska analyser av skjuvlastfallet visat att den acceptabla defektstorleken för detta lastfall är mycket mindre jämfört med isostatlastfallet [4-5]. Särskilt är inverkan av ytnära sprickliknande defekter påtaglig för skjuvlastfallet, något som inte alls är fallet för det vanliga isostatlastfallet. Ett problem med den deterministiska analysen av skjuvlastfallet är att det införts ett flertal pessimistiska antaganden som sammantaget troligen bidrar till de små acceptabla defekterna.

På samma sätt som genomfördes för isostatlastfallet är det därför av stort intresse att värdera ovan nämnda konservativa antaganden via en probabilistisk analys av insatsen för skjuvlastfallet. Syftet med detta dokument är att utgöra en planeringsrapport där förutsättningar och metodik redovisas, för en förstudie som är ämnad att ge en bra belysning av de parametrar som påverkar analysresultatet. Vidare beskrivs en förenklad analytisk modell som beskriver insatsen och skjuvlastfallet. Denna förenklade modell kan nyttjas vid genomförande av den probabilistiska analysen av skjuvlastfallet.

2 FÖRUTSÄTTNINGAR VID EN PROBABILISTISK ANALYS AV SKJUVLASTFALLET

BWR-insatserna I53-I57 har bedömts vara lämpliga som underlag till den probabilistiska analysen av skjuvlastfallet. Inspecta har genomfört en inventering av de parametrar som bedöms vara viktiga vid analyser av skjuvlastfallet. Inspecta bedömer att följande grupper av parametrar är signifikanta:

Parametrar relaterade till insatsens materialdata

SKB har tagit fram BWR-data för brottseghet (med/utan stabil tillväxt), sträckgräns (i drag), brottgräns (i drag) som är direkt tillämpliga vid en probabilistisk analys. Tryckprovdata behövs inte vid analysen, SKB har dock tagit fram även dessa data. Om det önskas att hänsyn tas till egenskaper vid högre töjningshastigheter måste nya data tas fram, detta gäller även ifall en PWR-kapsel önskas analyseras. Segjärnets brottförlängning kan också vara signifikant för insatsens integritet, även dessa data finns tillgängliga hos SKB.

Parametrar relaterade till antaganden om defekter i insatsen

Vid den probabilistiska analysen av isostatlastfallet användes en exponentiell defektfördelning med medelvärdet 1,9 mm, i studien postulerades sprickliknande defekter. Detta var ett pessimistiskt val med hänsyn till de då redovisade defektfördelningarna som varierade mellan 0,7 mm och 1,9 mm [1]. Ett problem med dessa fördelningar är att de togs fram utgående från äldre BWR-insatser (I24, I26). Idag vet vi att gjutprocessen är förbättrad med hänsyn till redovisad brottseghet, brottförlängning och defektstorlek, vilket måste kvantifieras i form av nya defektfördelningar för sprickliknande defekter. Vid en probabilistisk analys är det också lämpligt att kvantifiera sannolikheten att man inte hittar en defekt av en viss storlek. Här är det viktigt att det definieras ett gränssnitt mellan vald OFP-procedur och den probabilistiska modellen.

Parametrar relaterade till bentonitens densitet

Här ska aktuellt intervall (1950-2050 kg/m³) studeras och det bör även belysas om det finns orsak att studera andra antaganden rörande bentonitens densitet.

Parametrar relaterade till skjuvning av insatsen

Först är det aktuellt att beakta skjuvningens storlek, där det är en viktig fråga ifall detta ska hanteras deterministiskt eller probabilistiskt. Vid skadetålighetsanalysen har skjuvningens storlek antagits vara 5 cm eller 10 cm, vilket representerar olika sannolikhetsnivåer för att en kapsel ska utsättas för en skjuvlast. Detta borde medföra att skjuvningens storlek kan antas vara en probabilistisk parameter. Vidare bör det kvantifieras antaganden rörande var skjuvplanet träffar kapseln i axiell led, men även vilken vinkel skjuvplanet har mot kapseln. Vid den deterministiska analysen antogs ett pessimistiskt synsätt och detta bör kunna kvantifieras vid en probabilistisk analys.

En mer fullständig genomgång av aktuell kunskap för ovanstående parametrar redovisas i avsnitt 3.

För att kunna genomföra en probabilistisk analys av skjuvlastfallet måste en kritisk händelse definieras. Exempelvis kan det vara brott som kopplas till närvaron av sprickliknande defekter, definitionen av brott kan i sin tur motsvara initiering av spricktillväxt eller att en viss mängd stabil spricktillväxt erhålls. En annan form av kritisk händelse kan vara att en global kollaps av insatsen erhålls. Detta beskrivs i avsnitt 4, som också går igenom bakomliggande teori för hur man genomför en probabilistisk analys. Slutligen är det viktigt att studera hur de olika parametrarna påverkar slutresultatet, detta utförs i form av ett flertal känslighetsanalyser som diskuteras i avsnitt 5.

3 GENOMGÅNG AV PARAMETRAR

3.1 Insatsens brottseghet

SKB har genomfört flera provserier för att fastställa insatsens brottseghet. De provserier som genomfördes under 2003-2004, i samband med de probabilistiska analyserna för isostatlastfallet [1], är inte representativa för insatsens seghetsegenskaper idag. Brottseghetsprovning av den representativa provserien av insatser I53-I57 genomfördes under 2009, utvärderingen av denna provserie återfinns i [5]. Här redovisas brottseghetsdata, vid 0°C, i form av initieringsvärden samt värden motsvarande 2 mm stabil tillväxt. Brottseghetsprovningen utfördes i vätska, vilket påverkar den erhållna brottsegheten så att resultatet blir konservativt jämfört med brottseghetsprovning i luft. För att vara konsekvent med de använda brottseghetsvärdena i skadetålighetsanalysen, så har dock samma data använts. Brottseghetsdata härrör från insatserna I54, I55 och I57, för insatserna I53 och I56 togs data fram vid rumstemperatur vilket inte använts i skadetålighetsanalysen. Totalt ingår 25 värden i utvärderingen.

Förslag till fördelningar att använda vid en probabilistisk analys av skjuvlastfallet blir därmed [5]:

- Insatsens brottseghet vid initiering av spricktillväxt (J_{lc}):
Medelvärde = 34,4 kN/m.
Standardavvikelse = 4,15 kN/m.
Fördelning = Normal.
- Insatsens brottseghet motsvarande 2 mm stabil tillväxt (J_{2mm}):
Medelvärde = 90,8 kN/m.
Standardavvikelse = 7,87 kN/m.
Fördelning = Normal.

3.2 Insatsens sträck- och brottgräns

SKB har genomfört många provserier för att fastställa insatsens sträck- och brottgräns i både drag och tryck. De provserier som genomfördes av insatserna I24-I26 (under 2003-2004) i samband med de probabilistiska analyserna för isostatlastfallet [1], är representativa för insatsens egenskaper med avseende på tryckprovdata. Tryckprov utförda under 2007 för insatserna I53, I54, I55, I56, I57 och I63, visar att materialet ytterligare förbättrats, framförallt har spridningen minskat betydligt jämfört med I24-I26 [2]. När det gäller skjuvlastfallet är det däremot dragprovdata som är av störst intresse. Sådana prov har genomförts parallellt med tryckproven [6].

Vid de deterministiska analyserna av skjuvlastfallet [5] har sträckgränsen varierat mellan 267 MPa sann spänning vid statistiska analyser upp till 293 MPa sann spänning vid analyser där det införts ett töjningshastighetsberoende. På samma sätt har brottgränsen varierat mellan 480 MPa sann spänning vid statistiska analyser upp till 491 MPa sann spänning vid analyser där man införts ett töjningshastighetsberoende. Eftersom det på förhand är svårt att, för varje enskild probabilistisk analys, veta vilken töjningshastighet som är relevant utvärderas enbart konventionella dragprovdata [6] när fördelningar för denna analys tas fram (detta är pessimistiskt, eftersom högre värden erhålls vid högre töjningshastigheter). Vidare används data vid rumstemperatur [6] som också är pessimistiskt jämfört med data vid 0°C. Eftersom de små acceptabla defektstorlekarna fås mitt på insatsen mellan ändarna där höga dragspänningar uppstår, tas sträck- och brottgränsdata från mittskivan av insatsen. Data härrör från insatserna I53, I54, I55, I56, I57 och I63 [6] och det är totalt 36 värden som ingår i utvärderingen.

Förslag till fördelningar att använda vid en probabilistisk analys av skjuvlastfallet blir därmed:

- Insatsens sträckgräns (teknisk spänning):
Medelvärde = 279,8 MPa.
Standardavvikelse = 6,75 MPa.
Fördelning = Normal.
- Insatsens brottgräns (teknisk spänning):
Medelvärde = 397,7 MPa.
Standardavvikelse = 4,12 MPa.
Fördelning = Normal.

Ovanstående utvärdering utgår ifrån den provningsrapport som beskriver aktuell provning [6]. Vid de globala/lokala FE-analyser som utförs i huvudstudien så får dock sanna spännings-töjningskurvor skapas.

Förslag till fördelningar att använda vid en probabilistisk analys av skjuvlastfallet blir därmed (utgående från rådata motsvarande samma prov som redovisas ovan):

- Insatsens sträckgräns (sann spänning):
Medelvärde = 280,4 MPa.
Standardavvikelse = 6,77 MPa.
Fördelning = Normal.
- Insatsens brottgräns (sann spänning):
Medelvärde = 448,8 MPa.
Standardavvikelse = 6,39 MPa.
Fördelning = Normal.
Brottgränsen anges vid 12,1 % sann töjning (medelvärde från samtliga prov).

Vid FE-analyser behövs en mer fullständig sann spännings-töjningskurva, en sådan medelkurva redovisas i nedanstående tabell. Värden vid andra godtyckliga kombinationer av sträckgräns och brottgräns erhålls via en linjär skalning av nedanstående medelkurva.

Sann töjning	Sann spänning [MPa]
0,0000	0,0000
0,16900	280,40
1,9800	322,60
3,9200	361,00
5,8300	392,30
7,7000	414,60
9,5300	431,50
12,100	448,80

3.3 Insatsens brottförlängning

SKB har genomfört många provserier för att fastställa insatsens sträck- och brottgräns i både drag och tryck. I samband med dragproven redovisas också brottförlängningsvärden som kan användas vid definition av global kollaps. I designanalysen [7] redovisar SKB resultat från en utvärdering av 30 värden från insatserna I53, I54, I55, I56 och I57 (enbart från övre delen av insatsen, där man har sämst dragprovdata). Data från mitten av insatsen [6] är mer relevant för skjuvlastfallet, och vi väljer därför att använda samma data som ovan. Data härrör därmed från insatserna I53, I54, I55, I56, I57 och I63 [6] och det är totalt 36 värden som ingår i utvärderingen.

Förslag till fördelning att använda vid en probabilistisk analys av skjuvlastfallet blir därmed:

- Insatsens brottförlängning (teknisk töjning):
Medelvärde = 16,0 %.
Standardavvikelse = 1,83 %.
Fördelning = Normal.

Förslag till fördelning att använda vid en probabilistisk analys av skjuvlastfallet blir därmed (utgående från rådata motsvarande samma prov som redovisas ovan, här angivna som sann töjning):

- Insatsens brottförlängning (sann töjning):
Medelvärde = 14,8 %.
Standardavvikelse = 1,57 %.
Fördelning = Normal.

3.4 Defektfördelning för sprickliknande defekter

SKB genomförde en omfattande metallografisk och fraktografisk undersökning av insatserna I24 och I26 i samband med de probabilistiska analyserna för isostatlastfallet [1]. Utvärderingen visade att det var en tydlig koppling mellan redovisade brottförlängningar och funna defektstorlekar. Via en probabilistisk brottmekanisk modell kunde det tas fram defektfördelningar att senare använda vid de probabilistiska analyserna för isostatlastfallet. En exponentiell defektfördelning med medelvärdet 1,9 mm användes. Modellen antog att det fanns en sprickliknande defekt som sedan via en skalning gällde för hela insatsen. Denna defektfördelning är dock inte relevant för senare gjutna insatser I53-I57 eftersom gjutprocessen är avsevärt förbättrad, vilket också återspeglas av de redovisade brottseghets- och brottförlängningsvärdena. Däremot kan den gamla kopplingen mellan brottförlängning och defektstorlek [1, 8] nyttjas för att definiera en ny defektfördelning för sprickliknande defekter.

Den tidigare använda defektfördelningen med medelvärde = 1,9 mm som baserades på data från insats I24 motsvarar en brottförlängning med medianen 3,95 % [9]. De nyligen genomförda dragproven har en brottförlängning på 16 % (se avsnitt 3.3) vilket motsvarar en betydligt mindre medelstorlek på defektfördelning än proven från I24.

Genom att genomföra fraktografi av de 90 dragprovstavarna från I53-I57 så fås svar på vilka typer av defekter som finns i brottyterna, hur stora de är samt hur många defekter av respektive typ som återfinns. I samband tas det även fram förslag till defektfördelningar. Resultatet visar att en defektfördelning med medelvärdet 1,2 mm erhålls [10].

Som nämnts ovan antas att det finns sprickliknande defekter i materialet som sedan via en skalning gäller för hela insatsen.

3.5 Sannolikheten att man hittar en defekt med oförstörande provning

Vid en probabilistisk analys ska det också kvantifieras sannolikheten att det inte hittas en defekt av en viss storlek [11]. Här är det viktigt att definiera ett gränssnitt mellan vald OFP-procedur och den probabilistiska modellen. Det som eftersöks brukar benämnas POD-kurva, där POD står för Probability Of Detection. I nuläget finns det ingen kunskap om kvaliteten på de valda OFP-systemen. Observera att detta inte innebär att de valda systemen är av dålig kvalitet, det innebär enbart att det inte är kvantifierat.

Det finns alltså i nuläget ingen möjlighet att definiera en korrekt POD-kurva.

3.6 Typ av bentonit

I designanalysen [7] presenteras de bentonitantaganden som använts vid analysen av skjuvlastfallet [4]. Här framgår att den Na-bentonit som installeras i slutförvaret senare omvandlas till Ca-bentonit och att detta tar lång tid. Egenskaperna hos de två bentonittyperna är olika och påverkar analysen av insatsen där det i analysen pessimistiskt antagits att all bentonit är omvandlad till Ca-bentonit, därför är det av betydelse att reda ut vad som menas med lång tid. I designanalysen görs ingen mer värdering än att det kan anses vara realistiskt att all bentonit är omvandlad till Ca-bentonit [7]. I den probabilistiska analysen utgås det från att all bentonit har omvandlats till Ca-bentonit.

3.7 Bentonitens densitet

I designanalysen [7] presenteras de bentonitantaganden som använts vid analysen av skjuvlastfallet [4] och efterföljande skadetålighetsanalys av samma lastfall [5]. Det framgår bland annat att dessa analyser är genomförda i densitetsintervallet 1950 kg/m³ till 2050 kg/m³. I designanalysen sammanfattas skadetålighetsanalysen i form av acceptabla defektstorlekar [7] med utgångspunkt ifrån densiteten 2050 kg/m³ vilket är ett pessimistiskt antagande.

Bentonitens densitet härleds utgående från tidigare genomförda deterministiska analyser av skjuvlastfallet [4-5], vilket medför följande parametervärden:

- Bentonitens densitet: 1950 - 2000 - 2050 kg/m³.

3.8 Skjuvningens storlek

I designanalysen [7] presenteras de skjuvantaganden som använts vid analysen av skjuvlastfallet [4] och efterföljande skadetålighetsanalys av samma lastfall [5]. Det framgår bland annat att dessa analyser är genomförda med en skjuvning i intervallet 0, 5 och 10 cm. När skadetålighetsanalysen sammanfattas i designanalysen i form av acceptabla defektstorlekar [7] utgås det ifrån en skjuvning på 5 cm. När det gäller antaganden rörande skjuvningens storlek hänvisar designanalysen [7] till konstruktionsförutsättningarna för slutförvaret [12].

Det har beslutats att skjuvningens storlek hanteras som en deterministisk parameter samt att inte använda Forsmarks specifika förutsättningar i den probabilistiska analysen.

3.9 Skjuvhastighet

I designanalysen [7] presenteras de skjuvantaganden som använts vid analysen av skjuvlastfallet [4] och efterföljande skadetålighetsanalys av samma lastfall [5]. Det framgår bland annat att dessa analyser är genomförda med en skjuvhastighet på 1 m/s. Vid det densitetsintervall som är aktuellt för bufferten är den ganska styv. Styvheten är också en funktion av skjuvhastigheten, vilket medför att kapseln kan skadas vid mycket höga skjuvhastigheter. Dock är skjuvhastigheten i detta fall typiskt mindre än 1 m/s, vilket inte kan betraktas som en mycket hög hastighet. För att kontrollera detta antagande genomförs en känslighetsanalys, vid hastigheten 5 cm/s, för att visa om det erhålls något lägre spänningar och töjningar i insatsen.

Eftersom skjuvhastighetsantagandet inte påverkar analysen i någon större omfattning, behöver denna parameter inte beaktas i den probabilistiska analysen av skjuvlastfallet. Alla analyser genomförs med skjuvhastigheten 1 m/s.

3.10 Skjuvplanets vinkel/vinklar mot insatsen

I analysen av skjuvlastfallet [4] presenteras några av de skjuvantaganden som använts vid denna analys och efterföljande skadetålighetsanalys av samma lastfall [5]. Det framgår bland annat att huvuddelen av analyserna är genomförda där skjuvplanet är vinkelrätt mot kapselaxeln eller med 22.5° vinkel mot kapselaxel i drag. När skadetålighetsanalysen sammanfattas i designanalysen i form av acceptabla defektstorlekar [7] görs det med utgångspunkt av att skjuvplanet är vinkelrätt mot kapselns axel.

Förslag till fördelning att använda vid en probabilistisk analys av skjuvlastfallet blir därmed:

- Skjuvplanet är vinkelrätt mot kapselaxeln i samtliga analyser.

3.11 Skjuvplanets position i axiell led

I analysen av skjuvlastfallet [4] presenteras några av de skjuvantaganden som använts vid denna analys och efterföljande skadetålighetsanalys av samma lastfall [5]. Det framgår bland annat att analyserna är utförda så att skjuvplanet träffar mitt på kapseln eller på ett avstånd av $\frac{3}{4}$ av kapseln räknat från botten av kapseln. När skadetålighetsanalysen sammanfattas i designanalysen i form av acceptabla defektstorlekar [7] görs det med utgångspunkt av att skjuvplanet träffar kapseln på ett avstånd av $\frac{3}{4}$ av kapseln räknat från botten av kapseln.

Konstruktionsförutsättningarna för slutförvaret [12] anger att det enbart är skjuvplanets position i axiell led som kommer att påverka analyserna av skjuvlastfallet. Det antas i den probabilistiska analysen att alla positioner är lika sannolika.

Förslag till fördelning att använda vid en probabilistisk analys av skjuvlastfallet blir därmed:

- Skjuvplanets position i axiell led:
 - Medelvärde = Mitt på kapseln.
 - Undre gräns = Kapselns undre del.
 - Övre gräns = Kapselns övre del.
 - Fördelning = Likformig (rektangulärfördelning).

3.12 Isens tjocklek

När skjuvlastfallet uppstår kan inlandsisen ha en viss tjocklek. Eftersom kombinationen av isostatlast och skjuvning både är mindre sannolik och bedömd ge mindre påverkan än skjuvning utan stor isostatbelastning medför detta att försumbar istjocklek antas. Isens tjocklek beaktas alltså inte i den probabilistiska analysen.

4 PROBABILISTISK ANALYS AV SKJUVLASTFALLET

4.1 Definition av styrande/kritiska händelser

För att kunna genomföra en probabilistisk analys av skjuvlastfallet måste en kritisk (styrande) händelse definieras. Exempelvis kan det vara brott som kopplas till närvaron av sprickliknande defekter, definitionen av brott kan i sedan motsvara initiering av spricktillväxt eller att man erhåller en viss mängd stabil spricktillväxt. En annan form av kritisk händelse kan vara att en global kollaps av insatsen uppstår. Nedan beskrivs ett antal förslag på kritiska händelser som är relevanta för skjuvlastfallet.

Initiering av spricktillväxt

Om det antas att det finns sprickliknande defekter i insatsen finns det också en risk att dessa sprickor börjar växa vid ökande belastning. Den styrande storheten benämns spänningsintensitetsfaktor eller J -integralen. Man kan beräkna en kritisk defektstorlek via kriteriet $J = J_{lc}$. Här är J det pålagda J -värdet som erhålls via en icke-linjär FE-analys, J_{lc} är en materialparameter som benämns brottseghet och som visar hur motståndskraftigt materialet är mot initiering av spricktillväxt. Den kritiska händelsen blir därmed:

$$J = J_{lc} \quad (4.1)$$

En viss mängd stabil tillväxt

För material som inte har ett sprött brottbeteende så ger villkoret $J = J_{lc}$ enbart initiering av stabil spricktillväxt under ökande last. Detta medför att användandet av J_{lc} underskattar materialets verkliga brottbeteende. Ett mer realistiskt kriterium för material som har ett segt brottbeteende som segjärnet i insatserna, är att en viss mängd stabil tillväxt accepteras. Till exempel 2 mm stabil tillväxt som accepteras av SSM [13] för sega material. Begränsningen på 2 mm härrör bland annat från att det ofta är svårt att erhålla giltiga prov för större stabil tillväxt än 2-3 mm. Brottseghetsvärdet som inkluderar 2 mm stabil tillväxt brukar betecknas J_{2mm} . Den kritiska händelsen blir därmed:

$$J = J_{2mm} \quad (4.2)$$

Global kollaps

Skjuvlastfallet är ett fall med styrd förskjutning vilket medför vissa svårigheter att definiera en global kollaps av insatsen och kapseln. För att komma förbi detta problem definierade man i designanalysen [7] ett fiktivt ingenjörsmässigt kollapsvillkor som kopplade genomförda dragprov med avseende på brottförlängning och spänningstöjningskurvor till ger ett kritiskt spänningsmått, σ_{krit} . Detta kritiska spänningsmått σ_{krit} kopplades i sin tur till de effektiva spänningar σ_{eff} som erhölls från FE-analysen av skjuvlastfallet. Den kritiska händelsen blir därmed:

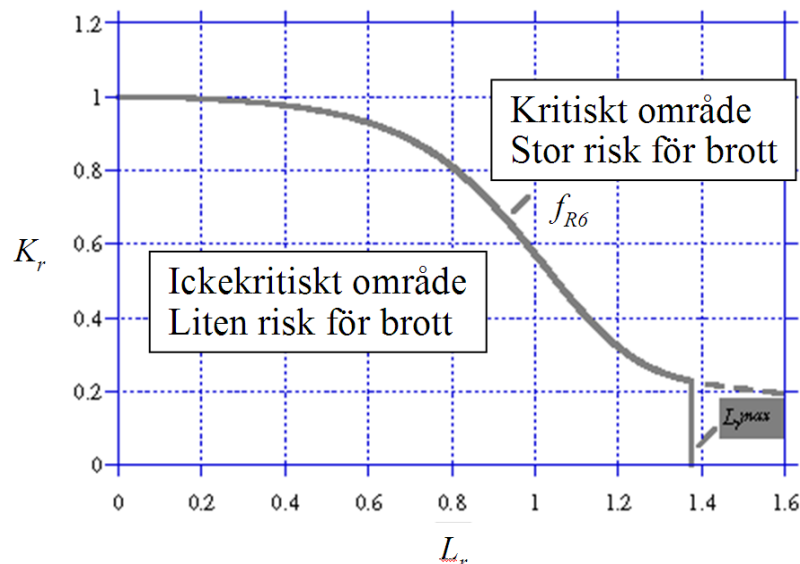
$$\sigma_{eff} = \sigma_{krit} \quad (4.3)$$

I princip skulle det istället kunna anges ett mer direkt villkor kopplat till ett kritiskt töjningsmått (ϵ_{krit}). Den kritiska händelsen blir därmed:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_{krit} \quad (4.4)$$

4.2 Bakomliggande teori

För att ta fram brotts sannolikhetsnivåer för skjuvlastfallet kan man utgå ifrån en deterministisk brottmekanisk metod kallad R6-metoden [11], en metod som rekommenderas av SSM [13]. I R6-metoden kontrollerar flera haverimekanismer; sprött brott via linjär brottmekanik, plastisk kollaps via gränslastanalys samt området däremellan via icke linjär brottmekanik. Detta framgår grafiskt i Fig. 4.1.



Figur 4.1. Figur som visar de mekanismer som beaktas inom R6-metoden.

Vid en probabilistisk R6-analys utgår man ifrån två stycken limit state-funktioner g_{R6} (brottvillkor) och g_{Lr}^{max} (villkor för plastisk kollaps). Med samma formalism kan man även utgå ifrån andra haverimekanismer, men det utelämnas i denna beskrivning. Brotts sannolikheten beräknas via följande flerdimensionella integral:

$$P_F = \Pr[g(X) < 0] = \int_{g(X) < 0} f_X(x) dx \quad (4.5)$$

Här gäller att X är en vektor som innehåller de probabilistiska/stokastiska parametrarna, g är en limit state-funktion, $f_X(x)$ är en flerdimensionell frekvensfunktion. Ovanstående integral är mycket svår (omöjlig) att lösa med konventionell numerisk integration. Inom detta projekt kommer man istället att lösa detta via MCS (enkel Monte Carlo-simulering), MCS-IS (Monte Carlo-simulering med Importance Sampling) samt FORM (First-Order Reliability Method). Hur det går till sammanfattas nedan, önskas en mer omfattande genomgång hänvisas till [11].

Vid Monte Carlo-simulering genomförs N deterministiska simuleringar och man kontrollerar hur många gånger som limit state-funktionen $g(X)$ har blivit mindre än noll (N_F). Brotts sannolikheten kan därefter beräknas via följande uttryck, $P_{F,MCS} = N_F/N$. MCS är en enkel, men mycket ineffektiv vid beräkning av brotts sannolikheter där ofta ett stort del av bidraget till slutresultatet finns i ett begränsad del av integrationsintervallet. MCS är i huvudsak användbar för kontroll och validering av sina analyser vilket också är syftet i detta projekt.

En mer intelligent simuleringsteknik är MCS-IS där simuleringarna koncentreras där de gör mest nytta. Istället för att simulera kring medelvärden på de ingående parametrarna (MCS) väljs att simulera kring den så kallade designpunkten eller den mest sannolika punkten för ett brott (MPP, Most Probable Point of failure). MCS-IS kräver alltså att man först tar fram MPP, vilket exempelvis kan göras via en FORM-analys som anges nedan. MCS-IS är mycket effektiv i jämförelse med MCS och är också den metod som nyttjas i detta projekt.

Att beräkna brottsannolikheten via en FORM-metod innebär att en analytisk och en approximativ metod kombineras. Man börjar med att transformera alla ingående stokastiska parametrar så att dessa blir standardiserat normalfördelade, ifall det finns beroenden mellan de olika parametrarna blir transformationen mer komplex. Därefter beräknar man det kortaste avståndet mellan origo och den nya transformerade gränssytan $g_U(u) = 0$ (motsvarar designpunkten/MPP). Detta avstånd brukar betecknas β_{HL} . För att kunna beräkna brottsannolikheten approximerar man gränssytan i anslutning till MPP. Om ytan till ett hyperplan approximeras erhålls följande uttryck, $P_{F,FORM} = \Phi(-\beta_{HL})$, där $\Phi(u)$ är en standardiserat normalfördelad fördelningsfunktion.

4.3 Steg för att genomföra en probabilistisk analys av skjuvlastfallet

Nedan beskrivs vilka steg som måste genomföras och vara färdiga innan en probabilistisk analys kan påbörjas.

- 1) Definiera vilka kritiska händelser som ska ingå i analysen.
- 2) Ta fram limit state-funktioner som motsvarar de kritiska händelserna under punkt 1.
- 3) Bestäm vilka parametrar som ska vara probabilistiska i analysen.
- 4) Ta fram fördelningar som beskriver de probabilistiska parametrarna.
- 5) Genomför globala FE-analyser, inklusive bentonit och randvillkor mot berget, för att få fram förskjutningar, töjningar och spänningar.
- 6) Genomför lokala FE-analyser med submodeller som innehåller olika defekter.
- 7) Ta fram de styrande parametrarna för de valda kritiska händelserna.
- 8) Sammanställ resultaten för att kunna approximera de gränssytor som behövs vid de probabilistiska analyserna. Ju fler FE-analyser som genomförs under punkt 5-6, desto bättre approximation erhålls.
- 9) Genomför probabilistiska analyser av skjuvlastfallet.

4.4 Förslag på parameterområde för de globala FE-analyserna

För att kunna genomföra de probabilistiska analyserna krävs det alltså att ett antal globala och lokala FE-analyser genomförs. Dessa används för att definiera de limit state-funktioner som motsvarar de valda kritiska händelserna. Nedanstående tabell sammanfattar ifall de olika parametrarna påverkar antalet FE-analyser.

Parameter	Påverkar antalet globala FE-analyser	Påverkar antalet lokala FE-analyser	Ingen direkt inverkan på antalet FE-analyser
Insatsens brottseghet			X
Insatsens sträck- och brottgräns	X	X	
Insatsens brottförlängning			X
Defektförd. för sprickliknande defekter		X	
POD-kurva			X
Typ av bentonit			X
Bentonitens densitet	X	X	
Skjuvningens storlek	(X)	(X)	X
Skjuvhastighet			X
Skjuvplanets vinkel			X
Skjuvplanets position	X	X	
Isens tjocklek			X

Anm: Skjuvningen storlek påverkar inte antalet FE-analyser om denna antas vara en deterministisk parameter.

Antalet globala FE-analyser är alltså beroende av insatsens sträck- och brottgräns, bentonitens densitet samt skjuvplanets position i axiell led. Antalet lokala FE-analyser är också beroende av antalet defektgeometrier som ska analyseras för att säkert täcka in valda defektfördelningar för sprickliknande defekter.

När det gäller insatsens sträck- och brottgräns bör åtminstone 3 kombinationer ingå (medelvärde \pm fem standardavvikelse) vilket medför följande parametervärden:

- Insatsens sträckgräns (sann spänning): 246,6 – 280,4 – 314,2 MPa.
- Insatsens brottgräns (sann spänning): 416,8 – 448,4 – 480,8 MPa.

Det bör också tidigt göras en känslighetsanalys för att kontrollera ifall ännu lägre sträckgränsvärden behövs för den probabilistiska analysen (medelvärde \pm tio standardavvikelse). När det gäller insatsens sträck- och brottgräns finns det också risk för tröskeleffekter som eventuellt bör ingå i analysen.

När det gäller bentonitens densitet bör åtminstone 3 kombinationer ingå utgående från tidigare genomförda deterministiska analyser av skjuvlastfallet [4-5], vilket medför följande parametervärden:

- Bentonitens densitet: 1950 - 2000 - 2050 kg/m³.

När det gäller skjuvplanets position i axiell led bör åtminstone 3 kombinationer ingå utgående från erfarenheter vid tidigare genomförda deterministiska analyser av skjuvlastfallet [4-5], vilket medför följande parametervärden:

- Skjuvplanets position i axiell led: Mitten - 3/4 - 9/10.

Det bör tidigt undersökas inverkan av denna parameter, oberoende av andra parametrar, för att undersöka behovet av fler eller färre positioner i axiell led.

5 FÖRSLAG PÅ KÄNSLIGHETSANALYSER

En viktig del av en probabilistisk analys är att genomföra känslighetsanalyser samt även redovisa styrande parametrar som bidrar mest till de redovisade sannolikhetsnivåerna. Nedan följer ett antal förslag på känslighetsanalyser:

- Jämförelse mellan olika brottseghetsantaganden (initiering respektive 2 mm stabil tillväxt).
- Jämförelse mellan analyser där bentonitens densitet är en deterministisk eller en probabilistisk parameter.
- Jämförelse mellan analyser där skjuvningens storlek är en deterministisk eller en probabilistisk parameter.
- Jämförelse med olika defektfördelningar från olika insatser, BWR och PWR.
- Jämförelse av brottseghet från olika insatser provade i vätska respektive luft.
- Jämförelse av olika skalning av defektfördelningen till att omfatta den fullstora insatsen.

6 REFERENSER

- [1] DILLSTRÖM, P., (2005-10), "Probabilistic analysis of canister inserts for spent nuclear fuel", SKB Technical Report TR-05-19, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [2] DILLSTRÖM, P., (2009-06-10), "Updated probabilistic analysis of canister inserts for spent nuclear fuel", Inspecta Technical Document 50006980-2, Rev. 1, Inspecta Technology AB, SKBdoc 1207426 - ver 1.0.
- [3] DILLSTRÖM, P., ALVELIND, L. and ANDERSSON, M., (2010-01), "Framtagning av acceptanskriterier samt skadetålighetsanalyser för segjärnsinsatsen", SKB Rapport R-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [4] HERNELIND, J., (2010-08), "Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load", SKB Technical Report TR-10-34, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [5] DILLSTRÖM, P. and BOLINDER, T., (2010-10), "Damage tolerance analysis of canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced rock shear load", SKB Technical Report TR-10-29, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [6] CLAESSION, S., (2011-02-18), "Test of mechanical properties on cast iron inserts for encapsulation of spent nuclear fuel, summary report", SKB Public Report, SKBdoc 1207576, Ver. 2.0, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [7] RAIKO, H., SANDSTRÖM, R., RYDÉN, H. and JOHANSSON, M., (2010-04), "Design analysis report for the canister", SKB Technical Report TR-10-28, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [8] ANDERSSON, C-G., et. al., (2005-11), "Probabilistic analysis and material characterisation of canister insert for spent nuclear fuel", SKB Technical Report TR-05-17, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [9] NILSSON, K-F., BLAGOEVA, D., and P. MORETTO., (2006), "An experimental and numerical analysis to correlate variation in ductility to defects and microstructure in ductile cast iron components", Engineering Fracture Mechanics, Vol 73, pp 1133–1157.
- [10] DILLSTRÖM, P., and ALVERLIND L., (2013-12-04), "Defect distributions for BWR- and PWR-insert material", Inspecta Technical Report 50017480-1, Rev 1, Inspecta Technology AB, SKBdoc 1417759, Ver. 1.0.
- [11] DILLSTRÖM, P., et. al., (2008), "A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks – Handbook", SSM Research Report 2008:01, Swedish Radiation Safety Authority.
- [12] —, (2009-11), "Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses", SKB Technical Report TR-09-22, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [13] BRICKSTAD, B., (2009-03-17). "Analys av driftinducerade skador i svenska kärntekniska anläggningar", Utredningsrapport 2008/232, Strålsäkerhetsmyndigheten.

7 REVISIONSFÖRTECKNING

Rev	Ändringsorsak / Berörda sidor eller avsnitt	Handläggare	Datum
0	—	Peter Dillström	2012-03-07
1	<ul style="list-style-type: none">- Alla avsnitt / Infört mindre ändringar som svar på kommentarer från SKB.- Avsnitt 3.3 / Infört brottförlägningsdata vid sann töjning.- Avsnitt 3.4 / En bättre defektfördelning tas fram i huvudstudien.- Avsnitt 3.4 / Skalningen definieras i huvudstudien.- Tar bort avsnitt 3.5, som behandlar porer, det är inte relevant (tar även bort hänvisningar i andra avsnitt samt ref. [10-11]). Omnumrering av resterande avsnitt och referenser.	Peter Dillström	2013-12-05
2	<ul style="list-style-type: none">- Infört ändringar med hänsyn till SKB:s granskning (SKB DokID 1419136, Ver. 0.4).	Peter Dillström	2014-02-02
3	<ul style="list-style-type: none">- Infört ändringar med hänsyn till SKB:s granskning (SKB DokID 1428354, Ver. 0.2).	Peter Dillström	2014-02-19