Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

Dokumentnamn		Löpnummer	Antal sidor
PROTOKOLL		**Arbetsmöte-processer i koppar Kryp**	11
Från		Sammanträdesdatum	
TPP Delprojekt GLS		**2016-04-18**	
Protokollförare	Signatur	Protokolljusterare	
[redacted]		[redacted]	
Övriga närvarande		Distribution i övrigt	
[redacted]		GLS	

Innehåll

1 Inledning 1
2 Kryp 1
2.1 Introduktion 2
2.2 Isostatiska lastfall – antagen krypduktilitet< 1% 6
2.3 Omättade hål 6
2.3.1 Mättade hål 7
2.3.2 Summering för krypfallet med isostatisk last mindre än 1% 8
2.4 Isostatiska lastfall – antagen krypduktilitet 5% 9
2.4.1 Omättade hål 9
2.4.2 Mättade hål 10
2.4.3 Summering för krypfallet med en isostatisk last av 5% 10
2.5 Vår bedömning 11

1 Inledning

Mötes presentationen ligger i 360 doknr. 16-1237 (GLS Arbetsmöte 2016-04-21--22 - Kryp).

2 Kryp

Krypning, en med tiden fortgående, starkt temperaturberoende långsam deformation hos vissa material under mekanisk belastning. Krypdeformation i metaller är av samma typ som plastisk deformation, dvs. orsakas av dislokationsrörelser (NE). Ett snabbare deformationsförlopp brukar betraktas som plastisk töjning.

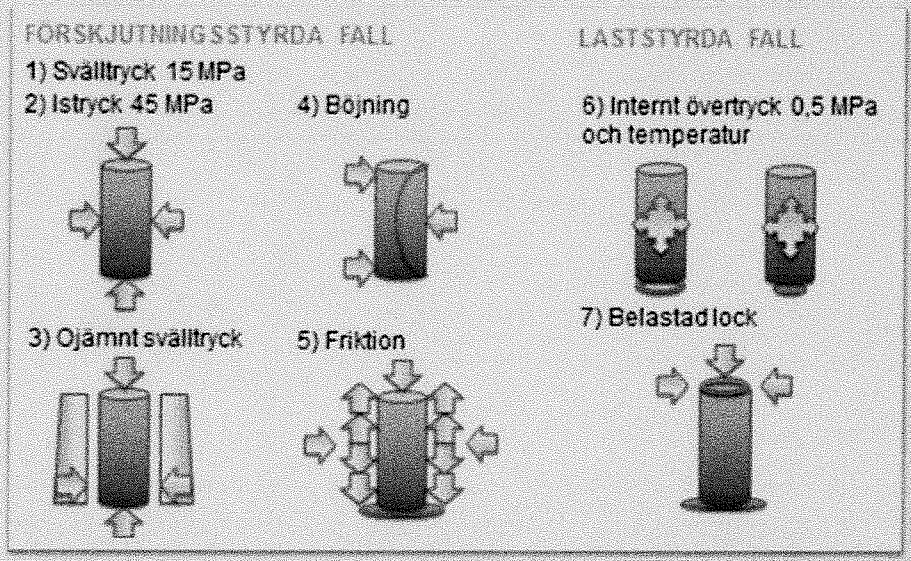
Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96
Tel:+46 8 799 40 00
Fax:+46 8 799 40 10
E-post: registrator@ssm.se
Webb: stralsakerhetsmyndigheten.se

2.1 Introduktion

I dagens och kommande möten diskuterades spänningarna och huruvida det kan förekomma kryp i kapseln. Figur ett visar vilka belastningsfall som användes. Inre laster orsakas av termisk utveckling och gasbildning medan yttre laster utgörs av trycket från svällande buffert, det hydrostatiska trycket samt glaciationseffekter. Ett svälltryck på 15 MPa motsvarar referensdensitetens övre gräns på 2 050 kg/m^3 med ett maximalt tillåtet montmorillonitinnehåll (90 wt%)[1]. Ett tryck på 45 MPa motsvarar det totala hydrostatiska trycket under referensglaciationen adderat till ett svälltryck på 15 MPa. Det hydrostatiska trycket under isfria förhållanden är ca 4,5 MPa, För referensglaciationscykeln är det extra hydrostatiska tryck som orsakas av istjockleken över Forsmark ca 26 MPa, vilket motsvara en istjocklek på ca 2900 m. Ett totalt tryck på 45 MPa är således ett rimligt förväntat maximalt tryck under kommande glaciationscykler. För koppar har det observerats att krypduktiliteten ökar efter mycket små tillsattser av fosfor[2], vilket är bra för då minskar risken för et tidigt sprött brott i kopparkapslarna. Det är kaviteter som initierar brott i korngränser och det krävs en större plastisk deformation för att bilda kaviteter när fosfor är närvarande; fosfor inverkar på koppars krypegenskaper genom att tillsatsen av fosfor ökar dess kryphållfasthet och förbättrar krypduktilitet. En möjlig förklaring har varit att fosfor minskar korngränsglidningen, men en sådan minskning efter tillsatts av fosfor till koppar har inte observerats[3]. I nuläget är förståelsen mekanismen bakom fosfors påverkan på koppar inte klarlagd (mer om detta nedan). Ingen vet med säkerhet heller hur svavel och väte klart negativa påverkan på krypduktilitetet är under längre tider

Man utvecklar snabbt ett svälltryck, dvs. luftspalten har försvunnit och trycket kan öka. Trycket ökar approximativt linjärt med den mängd vatten som tas upp. Det tar längre tid



Figur 1. Belastningsfall

[1] På ett djup av 500m är det hydrostatiska trycketr 5 MPa.
[2] Väte och svavel har motsattpåverkan, dvs. krypduktiliteten minskar.
[3] Se Grain boundary sliding in phosphorus alloyed oxygen-free copper under creep. SKB-R-15-14.

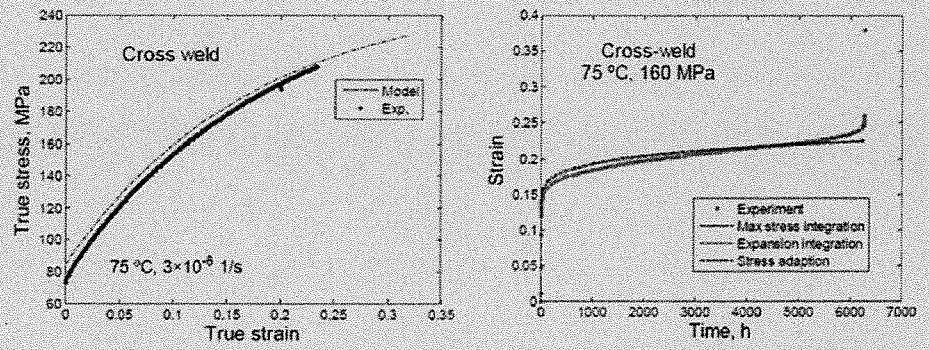


Fig. 12 Results for cross welds for Cu-OFP; a) Tensile flow curve 75°C, 3×10^{-6} 1/s. b) Creep strain versus time curve 75°C, 160 MPa 1/s. From [31]

att utveckla ett högt svälltryck, uppskattningsvis ett tiotal år för att nå relativt högt svälltryck baserat på rimligt vattenförande sprickor. SKB har en teoretisk modell baserat på korttidsförsök men finns det konceptuella brister. Vad kan man göra åt problemen som finns? Om man inte tror på SKB kan man inte utesluta att alla kapslar går sönder, om man tror på SKB så går inga kapslar sönder.

Dragprover och bilderna visar att provet går sönder vid ca 1 år[4] nedan. Det spelar ingen roll om det är dragspänningar eller skjuvspänningar, för hållfastighetsmarginalen är den samma. Till höger tar man ett prov och utsätter den för konstant temperaturer och konstant mekanisk belastning ("dead weight") för att se hur lång tid det tar innan brott sker. Kryp i figuren vid 75° och 160 MPa ligger på 20 30% innan brott sker[4]. När kan dessa tryck uppstå vid kapseln? En annan viktig aspekt är att deformationshastigheten är högst i början på grund av högre inledande temperaturer och tillgänglig luftspalt mellan kapseln och buffert. Deformationshastigheten kommer därför med tiden att minska, dels för att avståndet till bufferten kommer att minska betydligt när svälltrycket ökar dels för att

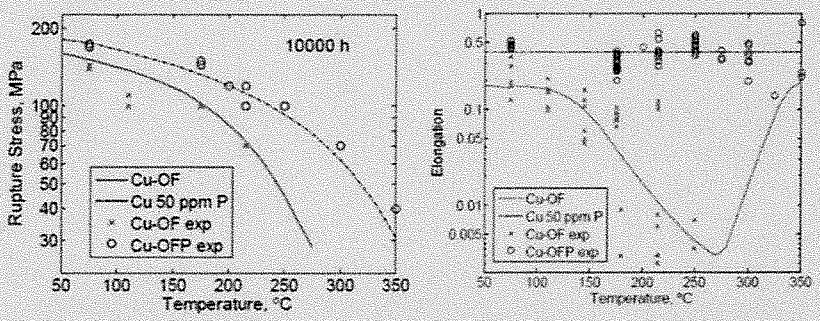


Fig. 1 Comparison of creep rupture properties between Cu-OF and Cu-OFP as a function of temperature. The model values will be discussed below; a) Stress that gives creep rupture after about 1 year; b) Creep elongation. From [7]

[4] Från The role of phosphorus for mechanical properties in copper, Rolf Sandström. SKBdoc id 1417069.

temperaturen med tiden minskar med tiden.

Vid krypförsöken kan man genom att öka den mekaniska belastningen och/eller temperaturen simulera hur materialet reagerar över tid (se figuren ovan)[4]. SKB:s modell flyttar kurvan mot kallare T för att simulera effekten över ca 100 år (se SKB TR-09-32, figur 8-5). Men SKB:s modell, framtagen av Sandström, baseras på ett relativt spretigt experimentellt underlag (se figuren ovan, från fig. 1 SKBdoc id 1417069) och den ger ingen bra förklaring till varför krypduktiliteten ökar efter tillsattser av fosfor. Så i nuläget är SKB:s prognostisering av kopparkapselns en kurvanpassning där en fundamental förståelse av mekanismen bakom varför krypduktiliteten ökar efter mycket små tillsattser av fosfor saknas. Dock, SSM bedömer att Sandströms[2] arbete är mycket bra men en stor brist är att det inte ger någon förklaring till fosfors inverkan på krypduktiliteten. Så här kommenterar SSM:s expert SKB:s arbete (2016:02):

> *I ett tidigare arbete, se SSM Technical Note 2012:13, drogs slutsatsen att SKB har presenterat otillräckliga bevis för att motivera sin ståndpunkt att fosforlegerad syrefri (OFP) koppar har en tillräcklig krypduktilitet under långtidsförvaring. Denna slutsats baserades på en studie om korngränsglidning i både OF och OFP koppar material vilken visade att grunden för SKB: s teori om krypsprödhet, som är nödvändig för extrapolering till lagringsförhållanden, var felaktig. Nyligen har SKB försökt att ogiltigförklara resultatet av studien om korngränsglidning. Det arbete som redovisas i denna rapport visar dock att resultaten för syrefri (OF) koppar från studien om korngränsglidning är förenliga med SKB:s teori (vilken har kalibrerats mot SKB:s resultat från OF koppar). SKB har enligt författaren i otillräcklig omfattning lyckats med att förklara varför OFP koppar med samma mängd korngränsglidning som OF koppar förblir segt under förhållanden där OF koppar beter sig.*[5]

I övningarna nedan har utgått från två fall med olika krypduktilitet; en med >1 och en med 5% krypduktilitet. Vidare baseras våra antaganden gällande maximala spänningar under mättade förhållanden utan glacialt förhöjda hydrostatiska tryck på SKB:s uppgifter från TR-09-32 (se figur 11-8, TR-09-32). Det invändes i gruppen mot detta eftersom SKB inte tillräckligt väl har redovisat varifrån dessa resultat kommer ifrån, finns inga referenser till datarapport eller liknande och TR-09-32 har bedömts att inte vara granskningsbar. SKB har kompletterat ansökan med fortsatta analyser[6] av dragspänningar pga. laster orsakade av inre processer hos kapseln och yttre laster. Det bestämdes därför att bilderna på spänningsfördelningen i kopparkapslen från kompletteringen vid glaciala hydrostatiska tryck var lämpliga som grund för fortsatta diskussioner (se figur 10-2, SKBdoc id 1399768 version 2).

---

[5] Utdrag från Technical Note2016:02, An updated review of the creep ductility of copper including the effect of phosphorus.

[6] Se bl.a. "Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads" SKBdoc id 1399768 version 2.

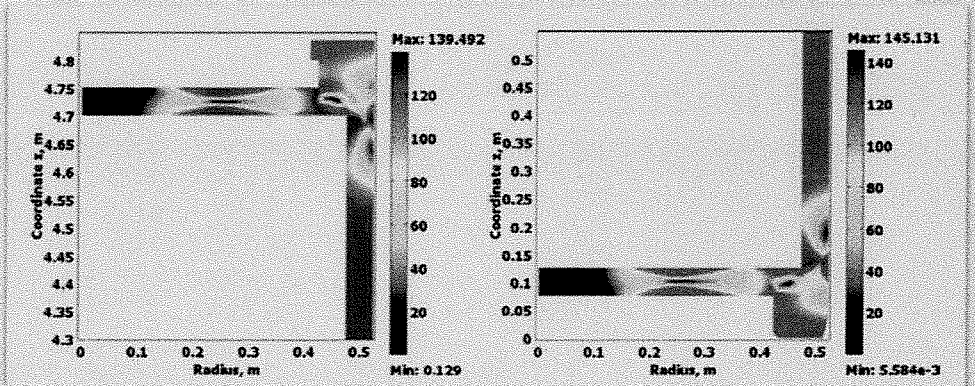


Figure 11-8. *Equivalent stress distribution in MPa in upper and lower corners of canister shell under outer pressure of 15MPa and at time 3.16×10^{7} s.*

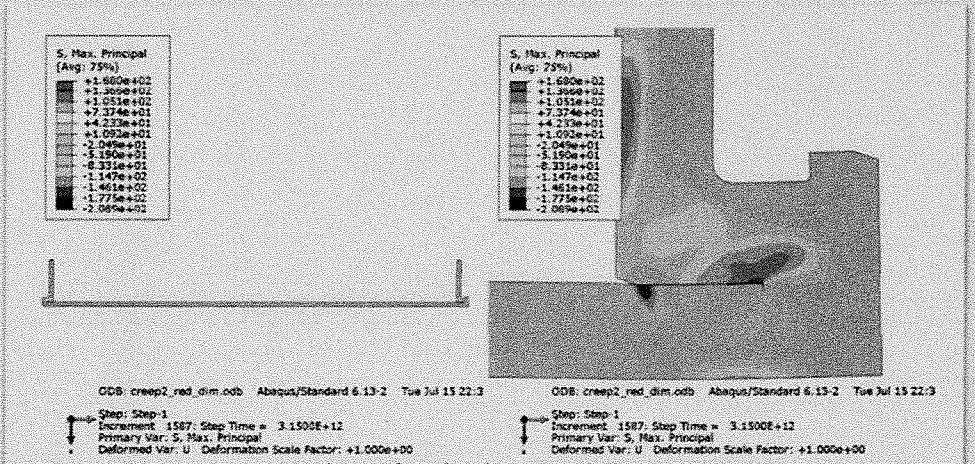


Figure 10-2. *Maximum principal stress [MPa] in the copper shell after 100 000 years, axi-symmetric analysis. This represents the situation after glaciations. No elements removed.*

Kommentar [PC1]: Kommentar till tabellen. Varaktigheten är mycket längre än 1000 år. Denna siffra baseras nog på hur länge förhöjda grundvattenflöden kan tänkas pågå när iskanten "står stilla" över förvaret. Och andelen kapslar som påverkas borde rimligen vara många och inte några få.

2.2 Isostatiska lastfall – antagen krypduktilitet < 1%

Lastfall	Max σ	Placering	Varaktighet	Förskjutning	Kyp-brott?	Signifikans	Andel påverkade kapslar
1) Svälltryck 15 MPa	145 MPa	Slitsen i topp och botten	Det tar upp till 20-30 år för att snabbast återmätta	5-10%	Möjligen	(krypduktilitet < 1% för långa tider?)	Många
2) Istryck 45 MPa	*P1* 179 MPa *P2* 159 MPa	Slits i topp och botten	Det kan förekomma under < 1000 år	10%		För några tillfällen efter 50000 år	Några få
3) Ojämnt svälltryck							
4) Böjning							
5) Friktion							
6) Inre övertryck 0,5 MPa och temperatur	200 MPa	Slitsen i topp och botten	Internt tryck blir 10 år från deponering.		Möjligen	Det motverkas av tidig bildning av liten svälltryck vilket tar ca 3 år	Många
7) Belastad lock							

2.3 Omättade hål

Eftersom bufferten är omättad är trycket från bufferten relativt marginellt jämfört med svälltrycket från en mättad buffert. Vi gör antagandet att 5 %, 10 % och 10 % av kapslarna går sönder under omättade förhållanden under tiderna 6000 år, 50 000 och 100 000 år.

Tid [år]	0	50	300	6000	Temperera d 50000	Glacial 100000
OMÄTTADE HÅL	6000	6000	2550	300	150	50
Temperatur/kapselytan	~102C	~80C	~55C	~18C	~11C	-4C – 11C
Lastfall Inre tryck0,5 MPa		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Max spänning σ						
Max förskjutning ε /kryp		Svälltryck på 0,5 MPa på 3 år	Svälltryck på 0,5 MPa på 10 år	Svälltryck på 0,5 MPa på 200 år	Svälltryck på 0,5 MPa på 1500 år	
Andel skadade kapslar		0 st	0 st	15 st	15 st	5 st
Antal påverkade kapslar						

2.3.1 Mättade hål

Tid [år]	0	50	300	6000	Temperera d 50000	Glaciai 100000
MÄTTADE HÅL	0	0	3450	5700	5850	5950
Temperatur/kapselytan	~102C	~80C	~55C	~18C	~11C	-4C – 11C
Lastfall 15 MPa		Nej	Ja	Ja	Ja	Ja
Max spänning σ			145 MPa	145 MPa	145 MPa	(179 MPa) 145 MPa
Max förskjutning ε /kryp			~1 %	~1 %	~1 %	(Korta kryptider < 1000 år och lågtemperatur) Låga temperaturer
Andel skadade kapslar		0 st	690 st	1556 st	105 st	25 st
Antal påverkade kapslar						

Fyll i hur vi kom fram till antalet skadade kapslar.

Jämfört med SKB:s modell (se figur 16, SKBdoc id 1417069), vilken baseras på upp till ett år långa experiment där olika belastningar har applicerats vid olika konstanta temperaturer varefter tiden till brott har dokumenterats, bör en spänning på 145 MPa inte vara något problem. Dock, som nämnts tidigare är det under förutsättning att koppar med fosfortillsatsen faktiskt beter sig på detta sätt på tider över 100 år.

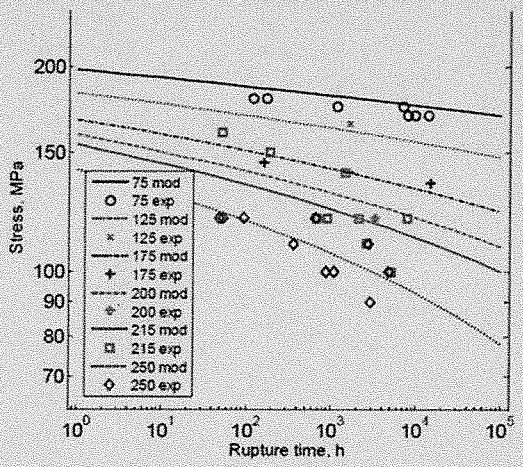


Fig. 16 Creep stress versus rupture time for Cu-OFP for temperatures from 75 to 250 °C. The model values are computed as the time when the first of ductile and brittle rupture occurs. From [44].

2.3.2 Summering för krypfallet med isostatisk last mindre än 1%

Tid [år]	0	300	6000	Tempererad 50000	Glacial 100000	TOTAL
OMÄTTADE HÅL	6000	2550	300	150	50	MÅNGA
	0	0	15 st	15 st	5 st	
MÄTTADE HÅL	0	3450	5700	5850	5950	MÅNGA
	0	690 st	1556 st	105 st	25 st	
HÅL MED BUFFERTEROSION	0	0	0	0	-	

TOTAL SKADADE KAPSLAR

SANNOLIKHET

2.4 Isostatiska lastfall – antagen krypduktilitet 5%

Eftersom krypduktiliteten ökar med en faktor 5 jämfört med fallet med en krypduktilitet på <1 % har antalet skadade kapslar genomgående reducerats med en femtedel.

Lastfall	Max σ	Placering	Varaktighet	Förskjutning	Kyp-brott?	Signifikans	Andel påverkade kapslar
1) Svälltryck 15 MPa	145 MPa	Slitsen i topp och botten	Det tar upp till 20-80 år för att snabbast återmätta	5-10%	Möjligen	Konstruktionsförutsättning Krypduktilitet > 5%	
2) Istryck 45 MPa	*P1* 179 MPa *P2* 159 MPa	Slits i topp och botten	Det kan förekomma under < 1000 år	10%		För några tillfällen efter 50000 år	
3) Ojämnt svälltryck							
4) Böjning							
5) Friktion							
6) Inre övertryck 0,5 MPa och temperatur	200 MPa	Slitsen i topp och botten	Internt tryck blir 10 år från deponering.		Möjligen	Det motverkas av tidig bildning av liten svälltryck vilket tar ca 3 år	
7) Belastad lock							

2.4.1 Omättade hål

Tid [år]	0	50	300	6000	Temperera d 50000	Glacial 100000
OMÄTTADE HÅL	6000	6000	2550	300	150	50
Temperatur/kapselytan	~102C	~80C	~55C	~18C	~11C	-4C – 11C
Lastfall Inre tryck0,5 MPa		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Max spänning σ						
Max förskjutning ε /kryp		Svälltryck på 0,5 MPa på 3 år	Svälltryck på 0,5 MPa på 10 år	Svälltryck på 0,5 MPa på 200 år	Svälltryck på 0,5 MPa på 1500 år	
Andel skadade kapslar		0	0	3 st	3 st	5 st

2.4.2 Mättade hål

Tid [år]	0	50	300	6000	Temperera d 50000	Glacial 100000
MÄTTADE HÅL	0	0	3450	5700	5850	5950
Temperatur/kapselytan	~102C	~80C	~55C	~18C	~11C	-4C – 11C
Lastfall 15 MPa		Nej	Ja	Ja	Ja	Ja
Max spänning σ			145 MPa	145 MPa	145 MPa	(179 MPa) 145 MPa
Max förskjutning ε /kryp			~1 %	~1 %	~1 %	(Korta kryptider < 1000 år och lågtemperatur) Låga temperaturer
Andel skadade kapslar			138 st	311 st	21 st	5 st
Antal påverkade kapslar						

2.4.3 Summering för krypfallet med en isostatisk last av 5%

Tid [år]	50	300	6000	Tempererad 50000	Glacial 100000	TOTAL
OMÄTTADE HÅL	6000	2550	300	150	50	MÅNGA
	0	0	3 st	3 st	5 st	
MÄTTADE HÅL	0	3450	5700	5850	5950	MÅNGA
		138 st	311 st	21 st	5 st	
FAL MED BUFFERTVERSION	0	0	0	0	-	
TOTAL SKADADE KAPSLAR						
SANNOLIKHET						

2.5 Vår bedömning

Gruppen konstarar att risken för kapselbrott pga. mekaniska belastningar går nog inte att undvika helt. Dock, det råder i gruppen en samsyn på att det går att konstruera kapseln så att krypfrågan inte är ett problem, vilket även ligger i linje med principen *bästa möjliga teknik*. Därför är det fullt möjligt att, genom att ändra kapseln konstruktions-förutsättningar[7], inte ha någon luftspalt etc., designa bort krypproblematiken. För osäkerheter som återstår bör forskning fortsätta för att kvantifiera deras betydelse. Det kan även tänkas att vissa frågor inte går att lösa och då kommer det handla om vilka osäkerheter som är acceptabla, dvs. göra en avvägning om osäkerheterna, och dess eventuella konsekvenser, med valt förvarskoncept trots allt är ett bättre alternativ än att föravara det i markförvar eller liknande.

Under mötet nämndes det att om man vill ha en förståelse för varför fosfor har en inverkan på koppar måste man ta reda på det och då måste SKB ta fram ett helt nytt underlag

Problemet är att för slutförvaret är tidskalan så extremt lång jämfört med de mer konventionella anläggningarna där vedertagna krypmodeller, som modellen enligt [redacted] används för att undersöka hur anläggningens delar uppträder över tider på tiotals år. Därför är det svårt att modellera kapslarnas krypbeteende över tid, bra modeller för att simulera detta finns inte eftersom dessa modeller baseras på data från korttidsförsök. Hur kan man extrapolera empiriska data med hjälp av "korttidsmodeller" över tider på tiotusentals år.

Det väsentliga i detta steg är om SKB visar att de har *förutsättningar* för kravuppfyllese. Men detta steg kan även ses som att vi bedömer huruvida tekniken överhuvudtaget är tillämplig vilket i nuläget det råder viss osäkerhet om den verkligen är..

I gropfrätning är det färre skadade kapslar och det är i omättade hål varför dess konsekvenser rimligen är mindre. För detta fallet gäller det fördröjningen av radionuklid spridningen; sprickan måste bli genomgående och utvidgas och vatten måste komma innanför kapseln. Vilken är sannolikehten för att detta ska ske, vilket scenario tillhör detta fall? Vi måste kolla konceptet och vilka områden som vi tycker att SKB måste göra fler insattser. Vi kan inte på mindre anmärkningar säga nej. Om vi säger att det inte finns förutsättningar har vi efter 40 års arbeten stora krav på att visa varför vi anser att de inte har förutsättningar för kravuppfyllelse. Våra argument måste vara mycket väl underbyggda.

[7] Krypduktilitetska vara mer än 15%. Vilket innebär att om inte tillräckligt bevis samlas för att tillstyrka detta kommer SKB inte att kunna använda sig av Cu-OFP.