



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Tillbakablick: SSM:s granskningar av segjärnsinsats

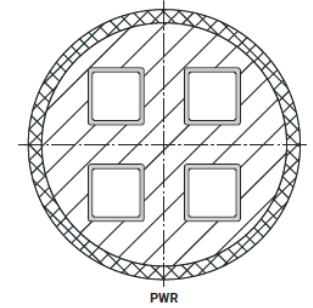
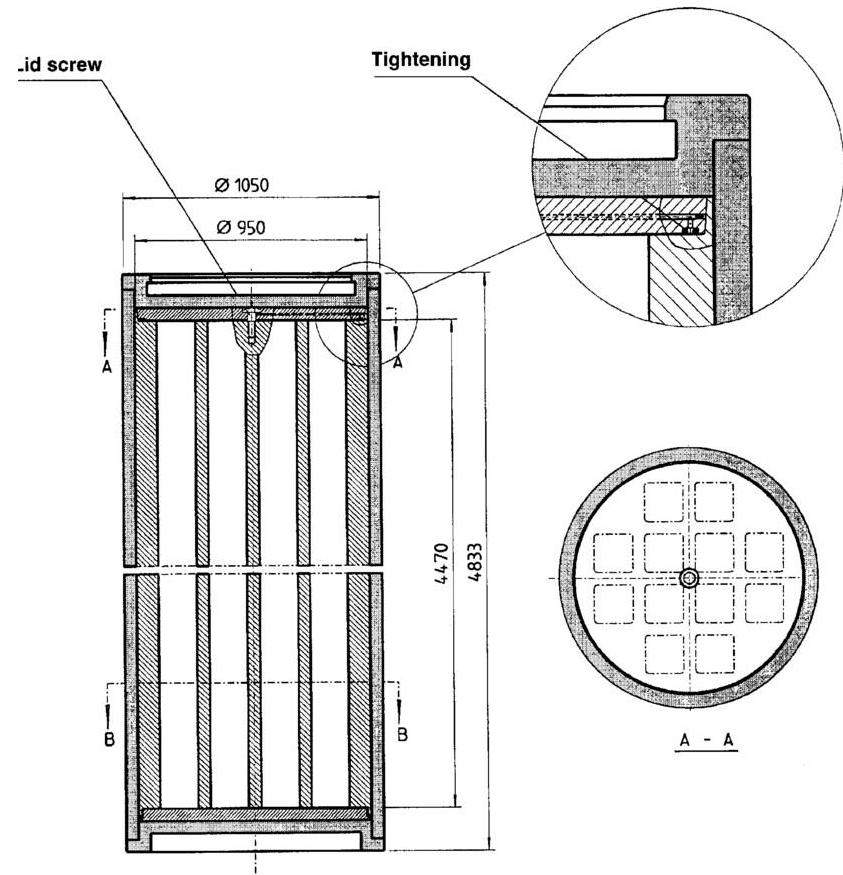
**Presentation vid Kärnavfallsrådets möte
Bo Strömberg, Enheten för anläggningssäkerhet**

30 november 2021



Disposition – granskning av insats

1. SSM:s föreskriftskrav som grund för granskning av insatsen
 - Härledning av funktionskrav på insatsen
 - Hantering av osäkerheter
2. Tidig utveckling och granskning av insatsen
3. SSM:s granskning av insatsen under tillståndsprövningen (SSM rapporten 2018:07)
 - De första 1000 åren (avsnitt 4.11)
 - Tiden efter de första 1000 åren och fram till 100 000 år (avsnitt 5.9, 5.10)
 - Tiden efter 100 000 år (avsnitt 6.3)
 - Tillverknings- och provningsfrågor (avsnitt 3.4)
 - SSM:s begäran om kompletteringar
4. Remissvar angående deformationsåldring

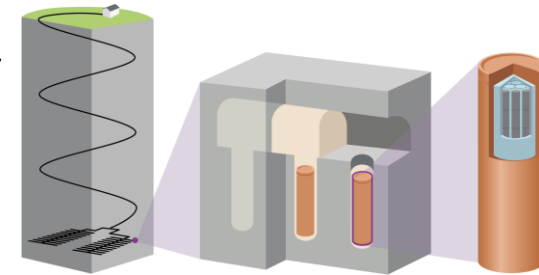




1. SSM:s föreskriftskrav som grund för granskning insats

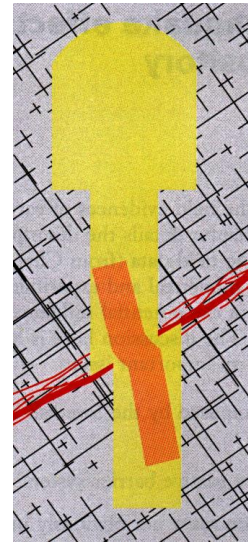
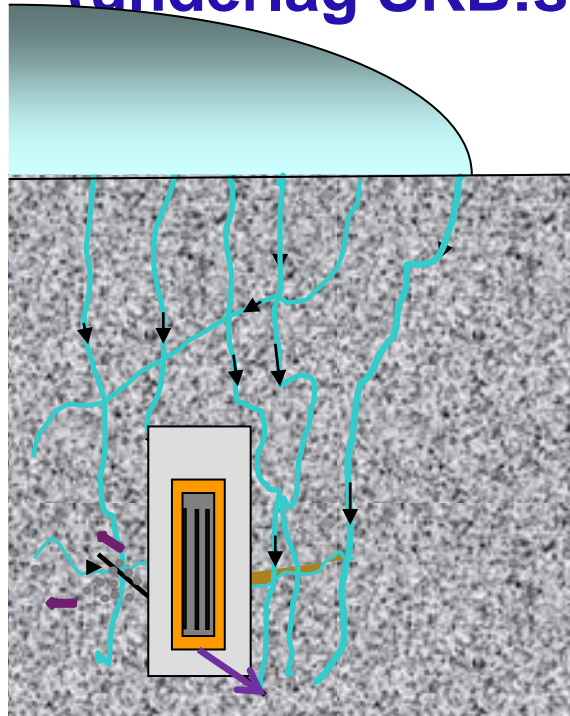
- ➔ Krav på barriärsystemets egenskaper samt krav på säkerhetsredovisningen (SSMFS 2008:21):
 - Insatsens tålighet och funktion i slutförvarsmiljön
 - Analys och hantering av osäkerheter

- ➔ Långsiktigt skydd av människors hälsa och miljön (SSMFS 2008:37):
 - Konsekvensanalys för viktiga förlopp i slutförvarets utveckling
 - Förutsätter fall med spridning av radioaktiva ämnen
 - Redovisning för olika tidsperioder
 - Kriterier för skydd av miljön och människors hälsa





Kapselbrottsfall i säkerhetsanalysen SR-Site (underlag SKB:s ansökan)



Källa: SKB TR 05-18
Mock-up experiment 140 MPa

1. Glacialt smältvatten
2. Erosion av bufferten
3. **Kapselbrott korrosion**

1. Stort jordskalv deformationszon
2. Propagering skjuvrörelser sekundär spricka
3. **Kapselbrott skjuvlast**

1. Höga isostatiska tryck förvarsdjup vid glaciation
2. **Kapselbrott isostatisk kollaps**



Säkerhetskoncept för insatsen

Lastbärande säkerhetsfunktion

Konstruktionsstyrande fall

- a) Isostatiska laster 45 MPa
- b) Skjuvlaster (jordskalv) 5 cm 1 m/s

Konstruktionsförutsättningar

- Materialegenskaper, geometri, tillverkningstoleranser, fördelning av defekter

Initiala tillståndet för insatserna

- Resultat från provtillverkning, oförstörande provning, dimensionsanalyser

Slutförvarsmiljön

- Platsegenskaper → initiala tillståndet

Scenarioanalys

- Externa förhållanden
 - Uppbyggnad av svälltryck
 - Framtida glaciationer
 - Stort jordskalv nära slutförvar
- Inre förhållanden
 - Hållfasthetsanalyser
 - Skadetålighetsanalyser
- Dos/riskberäkningar

Analys av kravuppfyllelse och slutförvarets skyddsförmåga

KBS-3
SR-97
SR-Can
SR-Site (FPSAR)
PSAR
SAR- P
SAR-R



Hantering av osäkerheter

- ➔ Strategier för hantering
 - 1) Eliminera och reducera betydelse (platsval, utformning av förvarsutrymmen och slutförvarskomponenter)
 - 2) Analysera och beakta (säkerhetsanalys)

- ➔ Känslighetsanalys för förståelse av osäkerheters betydelse
 - Deterministisk metod för att undersöka på förhand kända osäkerhetsfaktorer (modellering eller experiment)
 - Probabilistisk metod för analys av parameterkänslighet



Kategorier av osäkerheter (SSMFS 2008:21) - Exempel relevanta för insats

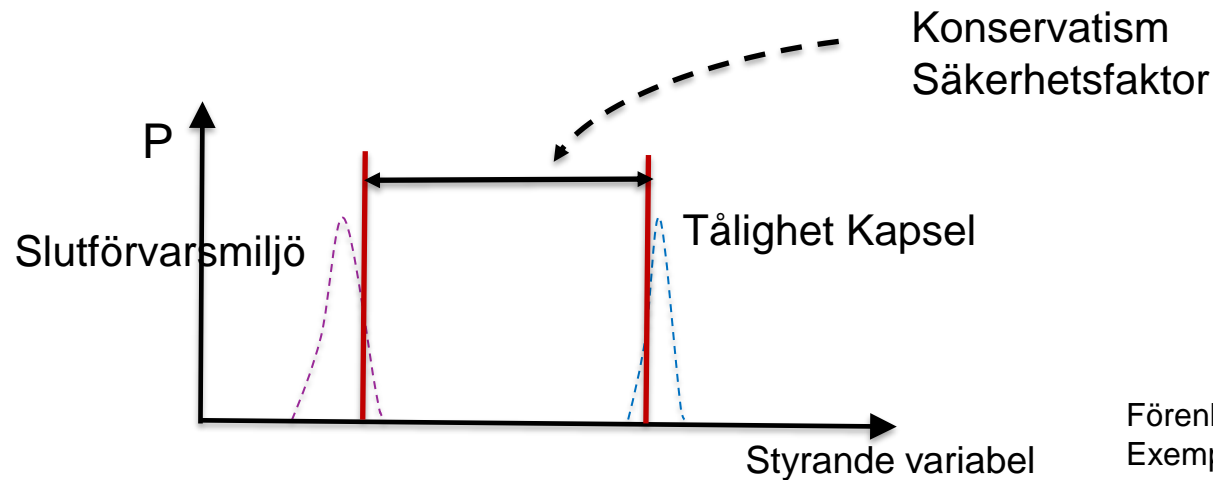
- ➔ Scenariosäkerhet
 - Tidpunkt och karaktär hos framtida glaciationer och postglaciala jordskalv
- ➔ Systemosäkerhet
 - Konceptuell förståelse av materialegenskaper, degraderingsprocesser, förståelse frekvens och magnituder för stora jordskalv
- ➔ Modellosäkerhet
 - Förenklade antaganden hållfasthets- och skadetålighetsanalyser
- ➔ Parameterosäkerhet
 - Maximal istjocklek, systematiska och slumpmässiga mätfel vid karakterisering av materialegenskaper
- ➔ Rumslig variation
 - Orientering och längd sprickor i berget



Representation av osäkerheter med syftet kravuppfyllelse

→ Deterministisk metod

- Definition och motivation av effektiva parametervärden

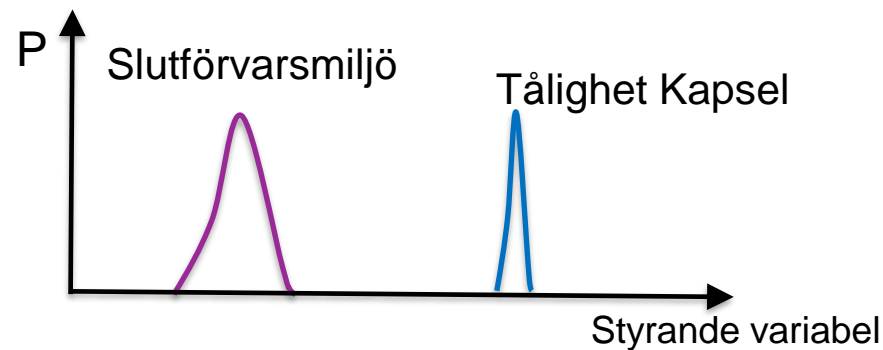


Förenklad bild
Exempel:
Isostatisk tryck på kapsel
Skjuvbelopp bergssprickor

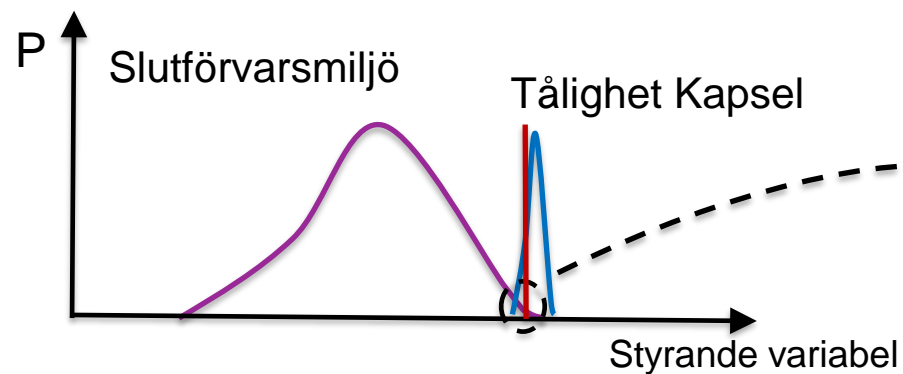


➔ Probabilistisk metod

- Explicit definition av sannolikhetsfördelningar för parametrar och/eller beaktande av sannolikheter för händelser



Fall utan kapselbrott



Fall med kapselbrott
förs vidare till riskanalys



Säkerhetsfunktionen retardation / avklingning



Kapselbrott

Bränsle-upplösning

Avklingning

Materieöverföring
närområde

Lösligheter
radionuklider

Sorption
bentonit

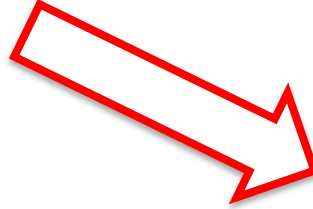
Kemiska
förhållanden

Grundvatten-
flöde

Matrisdiffusion

Sorption berg

Biosfär



Dos/risk

SSM:s
övergripande
Krav –
riskkriteriet



2. Tidig utveckling och granskning av insatsen

- ➔ KBS-3 (1984): Blyfylld kopparkapsel
- ➔ FUD-92: Koppar med inre stålbehållare
- ➔ FUD-98: Nuvarande kapsel med segjärn etableras fullt ut
 - Omfattande provtillverkning, kapsellaboratorium (Oskarshamn)
 - SKI: ” SKI håller med SKB om att segjärn är ett bättre val av material för insatsen än gjutstål.” ”SKI menar att SKB bör undersöka gjutkroppens faktiska mekaniska egenskaper, liksom identifiera och kartlägga förekommande defekter.”
 - KASAM: ” Sedan ett par år arbetar SKB med en innerkapsel av segjärn. Detta är en beprövad typ av tryckkärlsmaterial, och KASAM anser alltså att detta är en bra lösning.” ”Fortsatta studier av tillverkningstekniken är angelägna för att visa att mängden defekter kan begränsas så att innerkapselns integritet inte hotas.”



- ➔ Konstruktionsförutsättningar för kapsel (SKB R-98-08)
- ➔ Säkerhetsanalysen SR-97 (1999)
 - SKI/SSI granskning: betydelse av defekter och inhomogena materialegenskaper
- ➔ Säkerhetsanalysen SR-Can (2006)
 - SKI/SSI: Tillverkningsmetoder finns i princip, lämpliga materialval, saknas fullständig designanalys, OFP (Oförstörande Provning) behöver vidareutvecklas.
- ➔ Ansökan med säkerhetsanalysen SR-Site (2011)
 - Underbygga initiala tillståndet: 47 fullstora tillverkade insatser av BWR-typ, 8 st av PWR typ, 15 st fullständigt monterade kapslar
 - Designanalys kopparkapsel (SKB TR-10-28) + underlagsrapporter

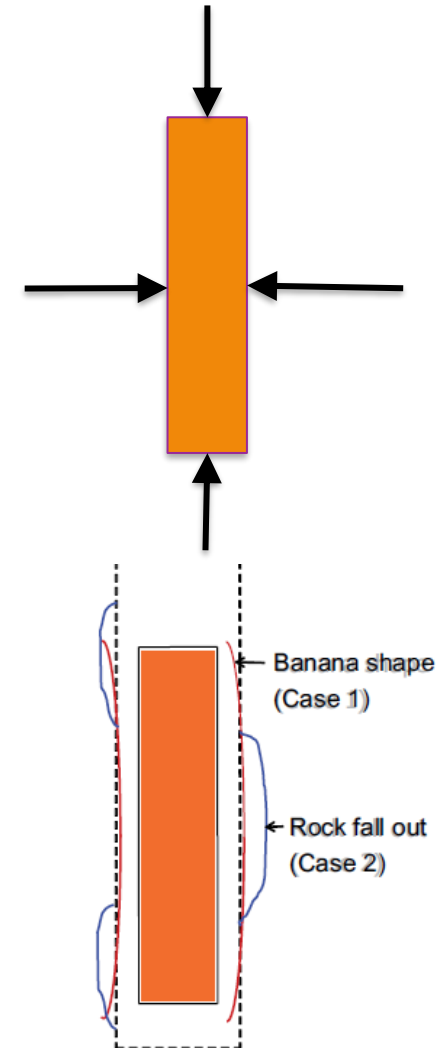


3. SSM:s granskning under tillståndsprovningen: De första 1000 åren (svälltrycksfall)

- ➔ Förutsättningar svälltrycksfall
 - Grundfall: Full utvecklat svälltryck bufferten + hydrostatiskt tryck (10 + 5 MPa)
 - Särskilt gränssättande beräkningsfall: Ojämn svällning buffert

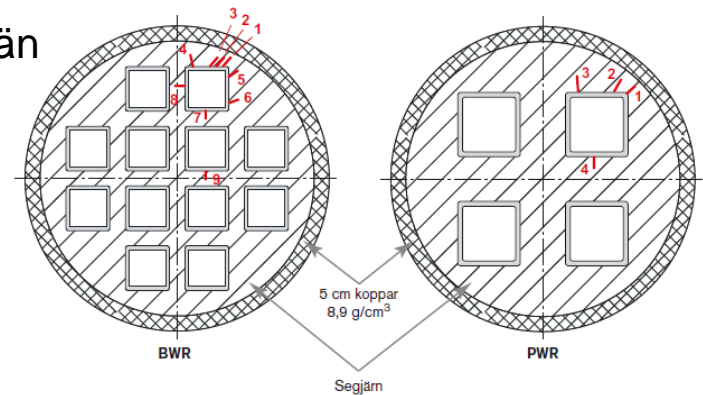
- ➔ SSM om tålighet isostatisk last
 - Hållfasthetsanalyser svälltryck genomförda med goda ingenjörsmässiga principer
 - Både PWR och BWR har tillräcklig integritet mot plastisk kollaps

 - Maximala spänningar små i förhållande till kollapståligheten.
 - Ojämn svällning ger viss böjspänning (110 MPa) som dock ligger långt under sträckgränsen





Avser hypotetiska snarare än faktiska defekter



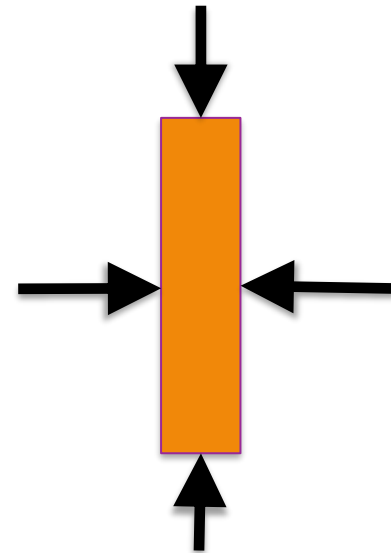
➔ SSM om skadetålighet svälltrycksfall

- Skadetålighetsanalyser enligt goda ingenjörsmässiga principer (R6-metoden för brottmekaniska analyser)
- Skadetåligheten relativt god
- Skadetåligheten för ansatta defekter i BWR kapslar, acceptabelt sprickdjup (sprickdjup:spricklängd 1:6):
 - 14 mm vid säkerhetsfaktorn $\sqrt{10}$
 - 48 mm vid säkerhetsfaktorn $\sqrt{2}$ (mindre sannolikt fall)
- SKB behöver i kommande steg via en kvalificeringsprocess visa att sådana defekter kan detekteras med oförstörande provning



Tiden efter de första 1000 åren och fram till 100000 år – isostatisk last (islaster)

- ➔ Förutsättningar isostatisk last framtida glaciationer:
 - Konstruktionsstyrande fall: Grundvattentryck 3500 m istjocklek + svälltryck 45 MPa (första stora nedisning efter 60 000 år)
 - Fall med global uppvärmning: 25 MPa (110 000 år)
 - Fall med utökad global uppvärmning: ingen nedisning
- ➔ SSM om tålighet plastisk kollaps islaster:
 - Hållfasthetsanalyser enligt goda principer (ANSYS)
 - Tillräcklig integritet i förhållande till plastisk kollaps vid konstruktionstrycket 45 MPa (i huvudsak linjär elastiska förhållanden)
 - Realistiska tryckprov har genomförts
 - Med istjockleken 4500 m i kombination med stora tillverkningsfel erhålls betydligt mindre marginaler





→ SSM om skadetålighet islaster

- Skadetålighetsanalyser enligt goda ingenjörsmässiga principer (R6-metoden för brottmekaniska analyser)
- Skadetålighet god för både PWR och BWR kapslar

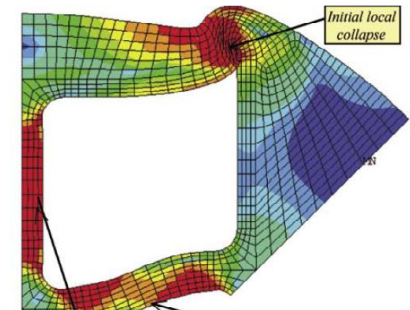
- Stora ansatta sprickdjup kopplas till utökade kompressiva spänningar till följd av islaster (säkerhetsfaktorn $\sqrt{10}$, sprickdjup:spricklängd 1:6):
 - 32 – 65 mm (BWR, utgående från perifert kanalrör)
 - 24 mm (BWR, mellan kanalrör)
 - 31 – 104 mm (PWR, utgående från perifert kanalrör)
 - 104 mm (PWR, mellan kanalrör)
- Acceptabla sprickdjup begränsas inte av brottsegheten och uppmätta restspänningar har mindre betydelse i sammanhanget



Exempel från SKB:s känslighetsanalys isostatiska laster

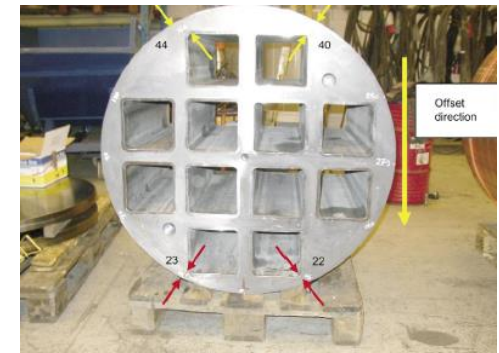
➔ Experiment (SKB TR-05-18)

- Tryckteter för två kapslar med fullskaliga tvärsnitt
- Global plastisk kollaps (krävs för kapselbrott och sker vid högre tryck än lokal plasticering):
 - 139 MPa för ena insatsen, för andra avbröts försöket utan kollaps (deformationer noterades dock vid lägre tryck)



➔ Probabilistisk modellering (SKB TR-05-17)

- Baserad på omfattande materialprovning: draghållfasthet tryckhållfasthet etc. (50 prover från vardera 3 insatser)
- Probabilistisk modellering – kollapstryck (isostatlast) vid olika defektfördelning och materialparametrar
- Exempel på resultat (sannolikhet plastisk kollaps vid 44 MPa)
 - Hörnradi 20 mm, excentricitet 0 mm $P = 10^{-21}$
 - Hörnradi 15 mm, excentricitet 0 mm $P = 10^{-5}$
 - Hörnradi 20 mm, excentricitet 5 mm $P = 10^{-9}$
 - Hörnradi 20 mm, excentricitet 10 mm $P = 0,3$

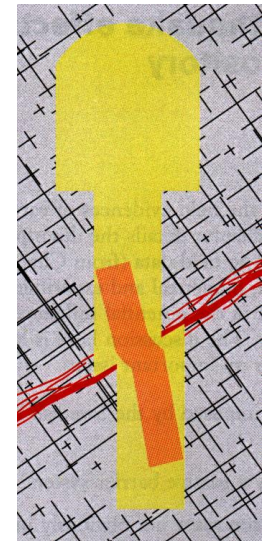




Tiden efter de första 1000 åren och fram till 100000 år - skjuvlaster

- ➔ Förutsättningar jordskalv/skjuvlastfallet
 - Konstruktionsstyrande lastfall: kapseln intakt vid skjuvrörelsen 5 cm, skjuvhastighet 1 m/s, buffertdensitet 2050 kg/m³, 0°C
 - Vid större skjuvbelopp anses kapseln fallerad
 - Analyserade fall: skjuvning vid 50 och 75 % av kapselns längd (skjuvningsvinkel 90°, 22,5°, 0°)

- ➔ SSM om tålighet skjuvlaster
 - Analyser gjorda enligt goda ingenjörsmässiga principer (ABAQUS)
 - Framräknade töjningar i insatsen acceptabla för 5 cm fallet





→ SSM mer om tålighet skjuvlaster

- Känslighetsanalyser visar på förhållandevis goda marginaler mot plastisk kollaps
- Inte uppenbart att kravställningen för brottöjning på 7 % kan visas vara uppfylld med befintlig metod (min värde för ett antal provstavar uttagna ur en toppskiva)
- Metodiken för säkerställa insatsens hållfasthetsegenskaper bör utvecklas, explicita analyser effekter av lokalt försämrade egenskaper hos insatsen
- Kombinerade lastfall påverkar inte nämnvärt resultaten (med hög isostatisk last, respektive ojämn svällning)



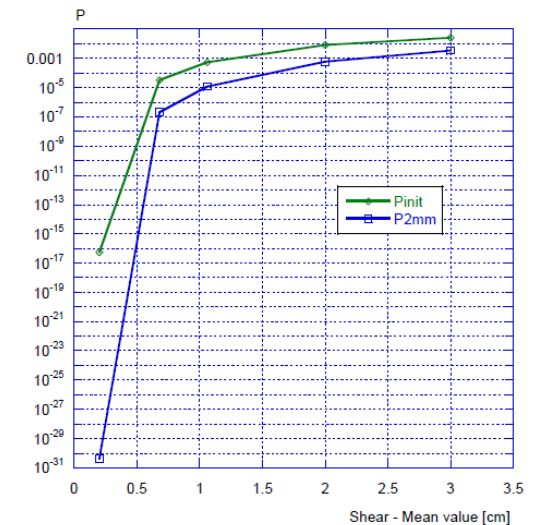
→ SSM om skadetålighet skjuvlaster

- Skadetålighetsanalyser väl utförda, men metod att härleda och beakta uppmätta brottseghetsvärden är inte nödvändigtvis konservativ
- Skadetåligheten är god för ansatta icke-ytgående sprickor
- För ytgående sprickor är skadetåligheten godtagbar men mindre sprickdjup behöver kunna detekteras (sprickdjup:spricklängd 1:6):
 - 4,1 mm (PWR)
 - 4,5 mm (BWR)
- SKB behöver i kommande steg via en kvalificeringsprocess visa att sådana defekter kan detekteras med oförstörande provning
- Kravställning i samband med skjuvlastfallet kopplas till att det är ett osannolikt fall.



Exempel SKB:s simulering, experiment och känslighetsanalys skjuvlastfallet

- ➔ Simulering av buffert och kapsel utsatt för skjuvlast (SKB TR-10-34)
- ➔ Modellering av skjuvexperiment kopparrstavar skala 1:10 (SKB TR-10-33)
- ➔ Probabilistisk modellering av sprickinitiering och stabil spricktillväxt vid olika skjuvbelopp (SKBdoc 1412158)





Tiden efter 100 000 år (och fram till 1 miljon år)

- Innefattar effekter av upprepade glaciationscykler. SSM:s föreskrifter:
 - Förenklade analysmetoder accepteras
 - Ingen strikt tillämpning av riskkriteriet
- Exempel från SSM:s bedömning
 - Isostatiska lastfallet
 - Ingen betydande förändring i förhållande till den föregående perioden
 - Skjuvlastfallet
 - Sannolikheten för att två på varandra förekommande stora jordskalv nära slutförvaret behöver beaktas (återkommandeperiod för ett andra större skalv $M > 5$)
 - Inre övertryck pga. bildning av helium i kapsel
 - Inre tryckökning liten och påverkar inte analyserna



Tillverkningsfrågor segjärnsinsats

- ➔ Exempel på SSM:s granskningsfrågor:
 - Tillverkning medför en spridning av materialegenskaper och och mikrostrukturella parametrar (nodulstorlek, andel perlit, grafitmorfologi m.m.) som mer utförligt behöver utredas
 - Metod att verifiera brottseghet och brottförlängning behöver vidareutvecklas
 - Uppfyllelse av materialkrav vid serietillverkning
- ➔ En mer preciserad gjutmetod krävs för att optimera processparametrar och defektspecifikation



Oförstörande provning av insats

- SSM:s granskning visade på utvecklingsbehov inom ett antal områden
- SSM bedömer dock att SKB kommer att kunna ta fram följande underlag:
 - En fullständig defektspecifikation som underlag för att ställa krav på OFP teknik
 - OFP-teknik för detektering, karaktärisering och höjdbestämmning av möjliga och postulerade defekter
 - Defektsimuleringsteknik med testblock med verklighetstroga defekter
- Oförstörande provning för den inre delen av insatsen (volymen mellan kanalrören) svår genomförbar
 - Insatserna bör i så fall visas vara relativt okänsliga för tänkbara defekter i dessa regioner



Kontrollordning vid tillverkning av insatsen

- ➔ Avser metod för verifikation av specificerade krav för varje tillverkad insats
- ➔ Baseras på kvalificering dvs. att i förväg kunna visa att tillämpade metoder kan uppfylla kraven
- ➔ Kvalificering innefattar ett flertal aktörer:
 - Swedac: Sveriges nationella ackrediteringsorgan (myndighet)
 - Ackrediterat kontrollorgan: har mandat att genomföra oberoende mätningar (tredjepartskontroller)
 - Kvalificeringsorgan: Säkerställer en förmåga hos det ackrediterade kontrollorganet
 - SSM: gör tekniska bedömningar kring uppfyllelse av SSM:s föreskriftskrav, och hanterar fall där de på förhand specificerade ramarna från SSM inte uppfylls
- ➔ Kontrollordningen är inte färdigutvecklad (PSAR)



SSM:s begärda kompletteringar insatsen samt exempel på frågor som har tagits upp (från 2012 tom 2017 med antal insatsbilagor)

- **Tillverkningsaspekter kopparkapsel (okt 2012, 1 bilaga insats)**
 - Klargörande av materialkrav (BWR, PWR)
- **Degraderingsprocesser insats (okt 2012, 1 bilaga insats)**
 - Inverkan av bestrålning på materialegenskaper (beräkningar och experiment)
- **Mekanisk integritet kapsel (mars 2014, 18 bilagor insats)**
 - Restspänningsmätningar
 - Statistisk analys av uppmätta materialegenskaper insats
 - Mätning av faktisk defektfördelning hos PWR och BWR insatser
 - Skjuvning av kapsel nära topp och botten
 - Modellering av skjuvning och därefter glacial last
 - Inverkan treaxliga spänningstillstånd



- ➔ Kontroll och provning av kapsel (sep 2014, 3 bilagor)
 - Kvalitetsledningssystem kapseltillverkning
 - Kravbild oförstörande provning
- ➔ Kapselns funktion driftsfas (apr 2013)
 - Säkerhetsklassning
- ➔ Konstruktionsförutsättningar kapsel (jan 2015, 1 bilaga)
 - Uppdatering av dimensionerande isostatlast (50 Mpa)
- ➔ Skadetålighetsanalys stållock (feb 2015, 1 bilaga)
 - Behov av skadetålighetsanalys
- ➔ Diverse frågor kapsel (juli 2015, 6 bilagor)
 - Uppdaterad samlad kravbild kapsel
- ➔ Försprödningsmekanismer insats (sep 2017, 1 bilaga)
 - Åldring, deformationsåldring, blåsprödhet av segjärn



4. Deformationsåldring: SSM:s remissvar

- ➔ Processen uppmärksammades först av kärnavfallsrådet
- ➔ SSM har tagit emot en komplettering om processen som en del av hanteringen av ansökan
- ➔ Regeringen önskar en förnyad bedömning av kapselns skyddsförmåga och kvarstående osäkerheter mot bakgrund av den nya forskningen från Finland (Björklund, 2021).
- ➔ SSM:s bedömning:
 - Det finska studien är väl genomförd



→ SSM:s bedömning:

- Inget behov att uppdatera den tidigare bedömningen av insatsens tålighet
- Insatsen utformas för att med tillräcklig säkerhetsmarginal motstå isostatiska laster. Deformationsåldring har liten relevans för de grundläggande lastfallen i slutförvarsmiljö.
- Processen skulle kunna ha en betydelse för insatsens tålighet för skjuvlastfallet. Detta förutsätter dock mer än en skjuvhändelse (jordskalv) i slutförvarets absoluta närhet påverkar en och samma kapsel. Sannolikheten för detta fall är mycket liten.
- Småskaliga och/eller långsamma bergmekaniska effekter förväntas inte ge upphov till deformation av insatsen mot bakgrund av den omgivande bentonitbuffertens kapacitet att ta upp rörelser i berget.



- ➔ Skjuvlastfallet innefattar hela slutförvarssystemet och kan inte hanteras enbart genom att ställa krav på kapseln:
 - Platsval för slutförvaret (tektonisk lins) –seismisk stabilitet, bergets hållfasthetsegenskaper
 - Förvarsdjup (bergrörelser minskar som funktion av djup)
 - Respektavstånd större deformationszoner – 600 m
 - Kartering av större sprickor som skär deponeringstunnlar och deponeringshål
 - Selektiv placering av deponeringshålspositioner
 - Optimering av buffertens egenskaper
- ➔ Avslutningsvis: tillverkning och provning av insatser kvalitetskritiskt moment vid drift av ett slutförvar
 - SSM förutsätter att SKB vidareutvecklar konceptet för insatsen och beaktar SSM:s granskningskommentarer som framkommit vid tillståndsprovningen



Generaldirektör

GD stab

Juridik

HR-sekretariat

Normering och kunskapsutveckling

Internationell policyutveckling

Nationell normering

Forskning

Utveckling av strålskydd och miljö

Utveckling av anläggnings säkerhet

Kommunikation och upplysning

Beredskap och tillståndsprövning

Tillståndsprövning strålskydd

Tillståndsprövning kärnteknik

Nukleär kontroll och säkerhetsprovning

Utveckling av skydd och beredskap

Genomförande av skydd och beredskap

Tillsyn

Tillsynssamordning och MTO

Tillsyn händelseuppföljning och teknik

Tillsyn allmänhet och miljö

Tillsyn patienter och arbetstagare

Tillsyn drift och avveckling

Myndighetsstöd

Ekonomi

Säkerhet och informationsförvaltning

IT