

# 21 – Säkerhet efter förslutning



## 21 – Säkerhet efter förslutning

Allan Hedin, civilingenjör teknisk fysik, doktor jonfysik  
Ansvarig för projekt SR-Site

### Översikt

#### Bakgrund

- Vad är en säkerhetsanalys?
- Historik
- Tidsperspektiv
- Föreskrifter

#### Säkerhetsanalysen i ansökan, SR-Site

- Metodik
- Data och information till grund för analysen
- Scenarier

#### Slutsatser

- SKB:s slutsatser i SR-Site
- Slutsatser i NEA:s granskning



## Inledning, perspektiv

Vad är problemet?

- Radioaktiviteten hos det använda kärnbränslet
  - Ger direktbestrålning i bränslets närhet
  - Kan ge internbestrålning om radionuklider från bränslet sprids i miljön

Vilken är den föreslagna lösningen?

- KBS-3-metoden med ett slutförvar i Forsmark

Är lösningen tillräckligt bra på riktigt lång sikt?

- **Analysen av säkerhet efter förslutning ska svara på detta!**

## Analys av säkerhet efter förslutning – allmänt

Analysen ska svara på frågan "Är förvaret långsiktigt säkert?"

- Kan förvaret i framtiden innebära en risk för människa och miljön?
- Metoder för analys etablerade genom internationellt samarbete
  - men varje nation behöver utarbeta sin egen "dialekt" för att passa nationell lagstiftning, geologiska förutsättningar, förvarskoncept, etc.

SSM:s föreskrifter anger vad samhället anser som "säkert"



<http://www.mestmotor.se/automotorsport>

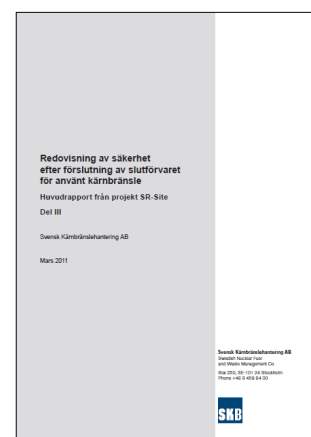
## Säkerhetsanalyser – historik (1/2)

- Den första omfattande analysen av säkerhet efter förslutning för ett KBS-3-förvar gjordes i den så kallade KBS-3-rapporten 1983
- Därefter har en rad förnyade analyser genomförts med
  - successivt mer detaljerad utformning av förvaret
  - ökande kunskaper om förvarets utveckling
  - ökande krav på analys av tider bortom 100 000 år
  - mer detaljerade platsdata
- Varje analys ger återkoppling till den nästföljande
- Ofta har analyserna granskats av myndigheter och internationella experter, som också givit återkoppling till kommande steg



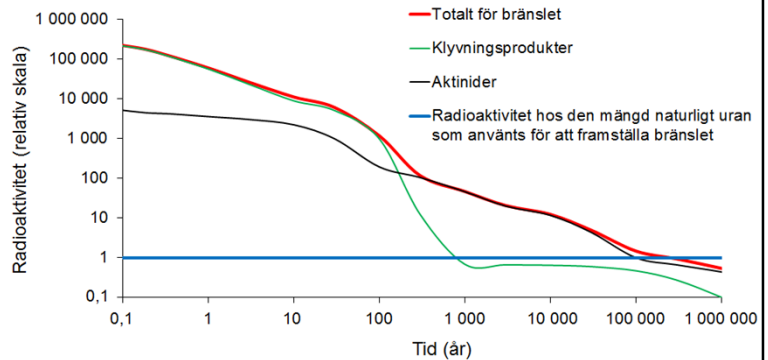
## Säkerhetsanalyser – historik (2/2)

- Metodiken för analysen har också utvecklats i internationellt samarbete, bland annat inom OECD:s Nuclear Energy Agency, NEA
- Analysen i ansökan, SR-Site (2011), föregicks av SR-Can (2006)
  - Metodiken i SR-Can utformades för att visa kravuppfyllelse enligt KTL
  - SR-Can granskades av SKI/SSI och deras internationella experter
  - SR-Site använder snarlik metodik, uppdaterad enligt granskningssynpunkter på SR-Can
- På samma sätt har SR-Site givit återkoppling till kommande analyser och vidareutveckling av underlaget till analysen
- På detta sätt utvecklas säkerhetsanalysen och dess underlag i steg
- Liknande stegvis förfarande i andra länder



## Bränslets radioaktivitet – tidsperspektivet

- Kärnbränsle tillverkas av uran, ett naturligt, radioaktivt material
- Vid drift i en reaktor ökar radioaktiviteten hos bränslet kraftigt
- Bränslet som går till slutförvaring är omkring 10 000 gånger mer radioaktivt än den mängd naturligt uran det tillverkades av
- Efter omkring 100 000 år har radioaktiviteten och farligheten avklingat till en nivå som åter är jämförbar med det naturliga materialets nivå
- Detta är grunden till de långa tidsperspektiven i säkerhetsanalysen
  - Varken bränslet eller natururan är dock ofarligt bortom 100 000 år



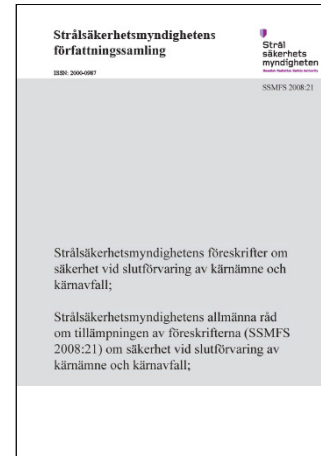
## Tidsperspektivet

- För slutförvaring krävs en miljö som kan förväntas vara stabil under mycket lång tid
  - Urberget vid Forsmark bildades för nästan 2 miljarder år sedan
  - Berget vid Forsmark har sedan dess genomgått mindre förändringar på förvarsdjup, orsakat av bland annat istider
  - I säkerhetsanalysen görs beräkningar och bedömningar av hur miljön på förvarsdjup kan förväntas utvecklas i ett miljonårsperspektiv
- Också människan (och samhället) kan förväntas utvecklas genom evolution under en sådan tidsperiod
  - Bedömningar och beräkningar av konsekvenser avser dagens människor

## SSM:s föreskrifter (1/2)

Två föreskrifter särskilt viktiga för säkerhet efter förslutning

1. SSM FS 2008:21 "Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall"
  - Krav att förvaret har ett multibarriärsystem
  - Krav på innehållet i analysen, hantering av osäkerheter, mm
  - Tillhörande Allmänna råd ger ytterligare vägledning

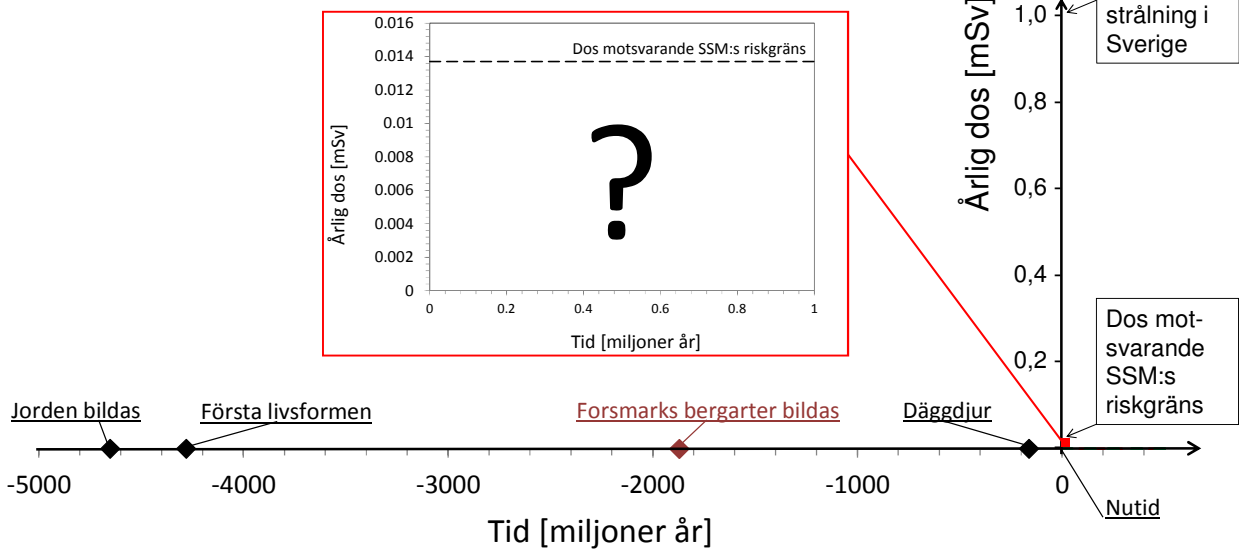


## SSM:s föreskrifter (2/2)

2. SSM FS 2008:37 "Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall"
  - Risker att drabbas av cancer eller ärftliga skador får inte överskrida en på miljonen per år. Omräknat till dos svarar det mot cirka 0,014 mSv/år, dvs ungefär **en procent av bakgrundsstrålningen**
    - "Omräkningsfaktorn" läggs fast i SSM:s föreskrifter och baseras på internationell standard
  - Säkerhetsanalysen ska omfatta en miljon år efter förslutning
  - Riskkriteriet är mest användbart de första 100 000 åren
  - Biologiska effekter av strålning i livsmiljöer och ekosystem ska redovisas
  - Tillhörande Allmänna råd ger ytterligare vägledning



## Tids- och dosperspektiv i säkerhetsanalysen



## Säkerhetsanalysen SR-Site – del av ansökan enligt KTL och MB

- Syften
  - att utvärdera säkerheten för ett KBS-3-förvar i Forsmark
  - att ge återkoppling till förvarsdesign, detaljerade undersökningar av platsen och forskningsprogram
  - I tidiga skeden ingick också att ge underlag för platsvalet 2009
- **Roll i ansökan: Visa att ett långsiktigt säkert KBS-3-förvar kan byggas i Forsmark**
- Säkerhetsrapporten omfattar endast platsen Forsmark
  - Platsval motiveras i särskild bilaga
- Analysen omfattar inte säkerhet under förvarets driftperiod

Resultat och slutsatser som presenteras i det följande gäller även med hänsyn taget till de kompletteringar som lämnats till SSM inom ramen för prövningen enligt KTL

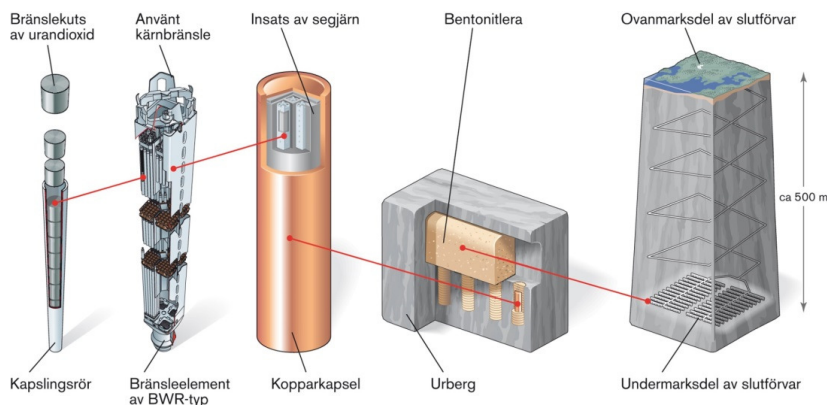
## Säkerhetsanalysen SR-Site

- Huvudrapport cirka 900 sidor
  - 40-sidig sammanfattning
- Omfattande underlag med mer än 100 rapporter
- Ytterligare material lämnat till SSM som kompletteringar i KTL-ärendet



## KBS-3-förvaret – säkerhetsfunktioner

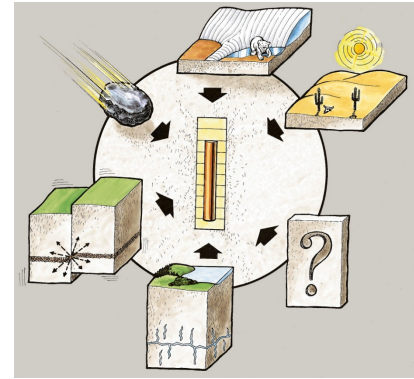
- Primär säkerhetsfunktion: **Fullständig inneslutning** i kopparkapslarna
- Sekundär säkerhetsfunktion: **Fördröjning av utsläpp** till berg och biosfär om kapslar skadas





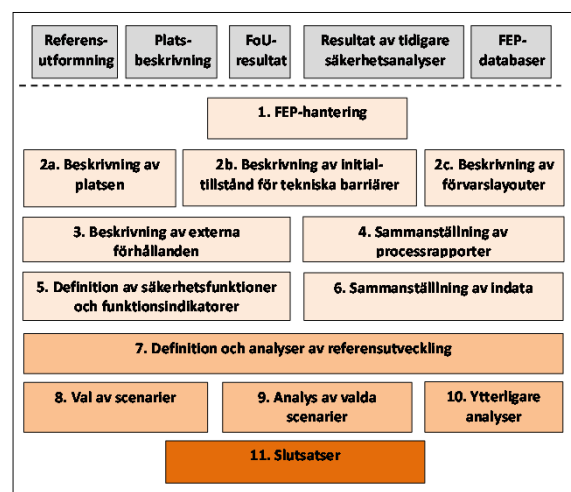
## Några huvudpunkter i metodik för säkerhetsanalys

- Nyckelfråga: **Kommer kapslarna att förbli täta** under hela analysperioden (1 miljon år)?
- Utgångspunkt: Kvalitetssäkrad beskrivning av förvarsbergets och de tillverkade komponenternas **tillstånd vid förslutning**
- För den framtida utvecklingen analyseras en rad **scenarier** för att täcka in möjliga händelseförlopp
  - T ex olika klimatutvecklingar och osannolika händelser som större jordskalv
- Om kapslar skadas i ett scenario beräknas konsekvenser i form av radionuklidutsläpp till omgivningen och doser till tänkta framtida människor som exponeras
- Konsekvensberäkningarna avgör om SSM:s riskkriterium är uppfyllt
- **Försiktighet**: Många osäkra faktorer hanteras pessimistiskt i bedömningar och beräkningar



## Detaljerad metodik i elva steg

- Utformad för att uppfylla SSM:s föreskrifter
- Influerad av internationellt samarbete kring metodikfrågor





## Data och information till säkerhetsanalysen (1/4)

### A. Den grundläggande vetenskapliga förståelsen

- Exempel på frågor
  - Hur fungerar det radioaktiva sönderfallet i bränslet?
  - Hur fungerar grundvattnets rörelser i berget?
  - Hur beständigt är koppar i olika miljöer?
  - Vad vet vi generellt om kommande istider?
- Sådan grundläggande förståelse kommer från den vetenskapliga litteraturen
- Ofta väl etablerad kunskap

$$M^k(t) = M_0^k \exp(-\lambda_k t) + \sum_{l=1}^{k-1} \left\{ M_l^0 \left\{ \prod_{j=1}^{k-l} \lambda_j \right\} \left[ \frac{\exp(-\lambda_j t)}{\prod_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^k (\lambda_n - \lambda_j)} \right] \right\}$$

## Data och information till säkerhetsanalysen (2/4)

### B. Mer specifik kunskap för att tillämpa vetenskaplig förståelse för slutförvaret

- Uppdragsforskning på universitet och högskolor
  - Tex om kopparkorrosion under slutförvarsförhållanden
- Egna laboratorieförsök för förståelse och teknikutveckling
  - Äspölaboratoriet – bergets funktion, kapsel/buffert/berg i "rätt miljö" under tidiga skeden av förvarets utveckling
  - Kapsellaboratoriet – svetsning, metoder för kvalitetskontroll
  - Bentonitlaboratoriet – metoder för tillverkning och kontroll av bentonitblock



## Data och information till säkerhetsanalysen (3/4)

### C. Många undersökningar görs i internationella sammanhang

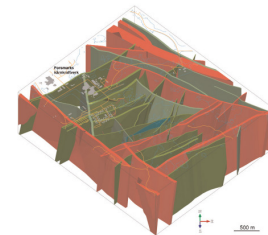
- Internationella samarbetsprojekt i Äspölaboratoriet
- SKB deltar i experiment och undersökningar i andra länder, t ex "Grönlandsprojektet", Greenland Analogue Project
  - Syfte: Utföra en analogstudie av en istid över förvaret
  - Avfallsorganisationer i Finland, Kanada och Sverige samfinansierade, cirka 20 universitet från dessa och andra länder deltog i arbetet
  - Fältstudier 2008–2013, analyser och rapporteringar -2015
  - 50 vetenskapliga artiklar, 6 avhandlingar, 20 rapporter
  - Kunde bekräfta förväntade förhållanden om bland annat tryck, avsaknad av syrgas och salthalt för grundvattnet i berget under en inlandsis



## Data och information till säkerhetsanalysen (4/4)

### D. Platsens egenskaper

- Exempel på frågor
  - Sprickstrukturer i berget
  - Dagens grundvattenflöden på platsen
  - Dagens grundvattensammansättning på platsen
- Studeras genom platsundersökningar
- Baserat på undersökningsdata byggs en modell av platsen



### E. De tillverkade barriärernas egenskaper vid deponering

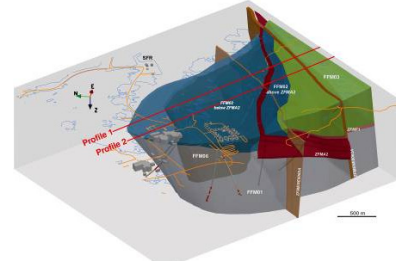
- Exempel på frågor
  - Kopparsvetsfogens kvalitet
  - Kapselinsatsens hållfasthet efter tillverkning
  - Buffertens densitet efter tillverkning och deponering
- Data från våra laboratorier och från provtillverkning och testning av kapslar
- Resultat från hållfasthetsberäkningar



## Hur ser förvaret ut från början?

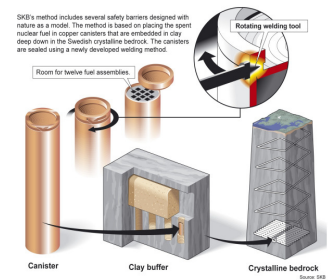
**Berget:** Kunskap genom platsundersökningar och geovetenskap

- Idag: Data från ytbaserade undersökningar
  - Data och tolkningar samlas i platsbeskrivande modell
- I nästa skede: mer detaljerade data från byggandet av förvaret



**Tillverkade komponenter:** Specifikationer av kapsel, buffert, återfyllning, etc

- Idag: Referensutformning, i någon mån provtillverkning, planer för kvalitetskontroll
- I nästa skede: Successivt ökad erfarenhet av tillverkning och kvalitetskontroll



## Huvudscenariot – en rimlig framtida utveckling

**Vad händer med förvaret på lång sikt?**

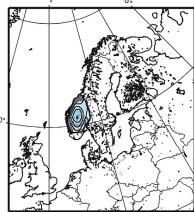
- Studerar först ett huvudscenariot = "rimlig" framtida utveckling
  - Basfall: 10 000 år av tempererat klimat, därefter en tänkt upprening av senaste 120 000-åriga istidscykeln; istider uppträder i långa cykler med gemensamma huvuddrag
  - "Växthusfall": Klimatet antas påverkat av mänskliga utsläpp av växthusgaser
- Vad händer med förvaret?
  - Studerar värmeutveckling i berget, grundvattenrörelser, jordskalv, buffertens stabilitet, korrosion av kopparkapslarna etc.
  - Modellberäkningar av förvarets utveckling baserat på dokumenterad kunskap om styrande processer
  - Ger förståelse för hela systemets funktion och utveckling; ligger till grund för vidare analyser
  - Analysen av huvudscenariot utgör cirka 1/3 av huvudrapportens cirka 900 sidor
- Centrala frågor
  - Vilka förlopp ger påfrestningar på kapslarna?
  - Kan kapslar gå sönder och i så fall hur?

## Huvudscenariot – processer

- I huvudscenariot studeras fler än 100 termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska processer/förlopp i kapsel, buffert, berg och omgivning
- I kommande bilder ges några exempel
  - Inlandsisars utveckling
  - Hydrologiska förlopp i buffert och berg
  - Kopparkorrosion
  - Den så kallade bastueffekten

## Exempel – inlandsisen i huvudscenariot

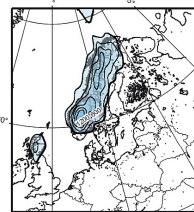
11 kyrs after present



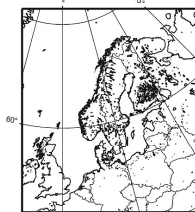
21 kyrs after present



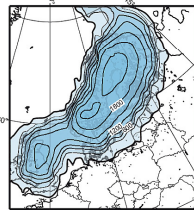
36 kyrs after present



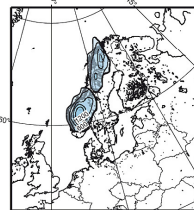
41 kyrs after present



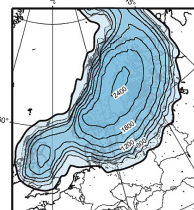
63 kyrs after present



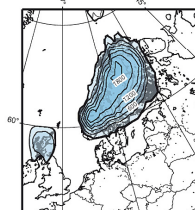
74 kyrs after present



103 kyrs after present



109 kyrs after present



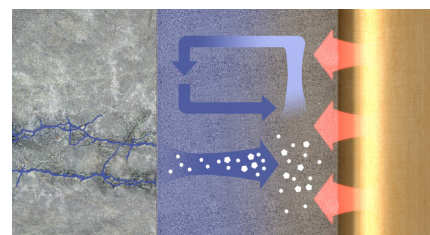
## Exempel – hydrologiska förlopp i buffert och berg

### Grundvattenflöden

- Studeras i flera tidsepoker och på flera skalor – från regional skala till "deponeringshållsskala"
- Hydrogeologisk modell av platsen baserad på data från platsundersökningarna
- **Speglar att berget i Forsmark är fattigt på vattenförande sprickor på förvarsdjup**

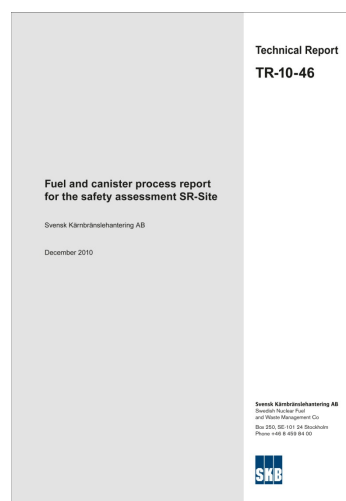
### Vattenmättnadsförloppet för buffert och tunnelåterfyllning

- De varierande förhållandena i Forsmark gör att **tiden för vattenmättnad varierar från tiotals till tusentals år** mellan olika positioner i förvaret
- Lång tid för vattenmättnad är i princip positivt – speglar att hydrologiska förlopp sker långsamt vilket är positivt för säkerheten
- Ställer dock också större krav på att förstå förloppen som är verksamma under omättade förhållanden



## Exempel – kemisk utveckling, kopparkorrosion (1/3)

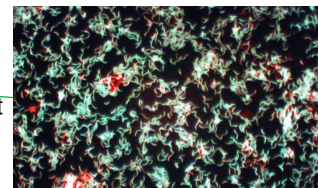
- Koppar valt som kapselmateriale eftersom det har gynnsamma korrosionsegenskaper i slutförvarsmiljön
- Kopparkorrosion i slutförvaret analyserat redan i KBS-3-rapporten 1983
- Viss korrosion kommer alltid att ske i slutförvaret, tjockleken 5 cm har i tidigare analyser visats ge ett tillräckligt korrosionsskydd
- Ställer samman teoretisk och experimentell kunskap, resultat av fältstudier, slutsatser från naturliga förekomster av koppar och arkeologiska objekt etc i särskild rapport för säkerhetsanalysen
  - Diskuterar både etablerade fakta och kvarstående osäkerheter
  - Granskas av utomstående experter på vårt uppdrag



## Exempel – kemisk utveckling, kopparkorrosion (2/3)

Vad kan orsaka korrosion?

- Begränsade mängder **syrgas som "stängs in"** i leran som omger kapslarna och fyller ut tunnarna; **den instängda mängden svarar mot mindre än 1 mm korrosion**
- Den begränsade del av **strålningen** från det använda bränslet som tränger igenom kapslarna kan sönderdelat ex vattnet i bufferten till korrosiva ämnen
  - Studerat experimentellt och teoretiskt sedan 1980-talet; samlad effekt av all strålning som avges från bränslet orsakar korrosion av **bråkdel av mikrometer**
- Svavelföreningen **sulfid** i grundvattnet och i leran som omger kapslarna
  - Rikligt med mätdata av sulfidhalter och grundvattenflöden i Forsmark
  - Bidrag också från **mikrober** som kan omvandla sulfat i leran och grundvattnet till sulfid
  - Mer gynnsamma förhållanden för mikrober innan leran vattenmättats och svällt
  - Kan i värsta fall orsaka några millimeters korrosion innan bufferten mättats



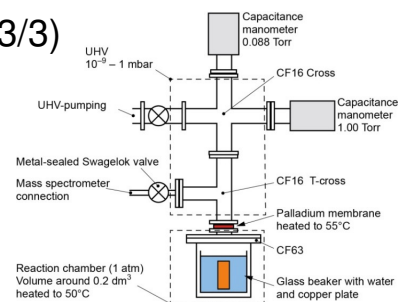
**Övergripande slutsats:** Alla kapslar förblir hela i ett miljonårsperspektiv så länge bufferten är på plats

- Tar då också hänsyn till att korrosion kan ske ojämnt över kopparytan

## Exempel – kemisk utveckling, kopparkorrosion (3/3)

**Orsakar rent vatten kopparkorrosion?**

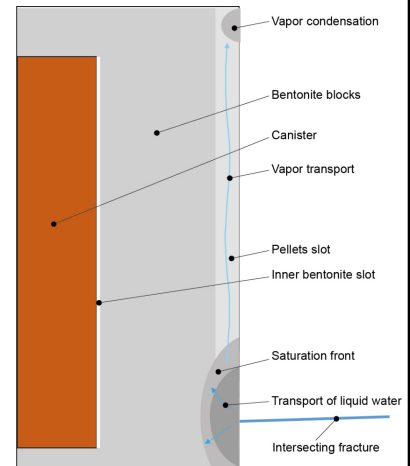
- Ja, men i oerhört ringa omfattning enligt etablerad vetenskap
- En grupp forskare har tolkat sina experiment så att omfattningen är mycket större
- Andra forskargrupper har upprepat experimenten mer kontrollerat; ser inget som tyder på korrosion
- Om vi tolkar mätdata från forskarna med avvikande uppfattning som korrosion ger det ändå bara någon millimeter på en miljon år
- Våra slutsatser
  - Det vetenskapliga stödet för den alternativa uppfattningen är mycket svagt och motsägs av mer noggranna experiment
  - Omfattningen skulle ändå vara begränsad och inte hota kapseln





## Exempel – ”bastueffekten”

- Effekten innebär att salthaltigt vatten som når en het yta förångas och lämnar saltavlagringar på ytan.
- Kan grundvatten som når den varma kapseln då bufferten vattenmättas ge upphov till detta?
  - Saltavlagringarna skulle i så fall kunna bidra till korrosion.
- Effekten studerad av SKB i olika arbeten sedan 1995.
- Grundläggande begränsning: Eventuellt förångat vatten kondenserar i bentoniten nära den varma kapseln. Bentoniten sväller då och förhindrar ytterligare ångflöde. Ångan lämnar aldrig deponeringshålet.
  - Nya försök (2013–2017) bekräftar åter detta. Sammanfattningsrapport TR-17-07 nyligen publicerad. Flera ytterligare, oberoende argument för att processen är försumbar i rapporten.
- Effekten bedöms som försumbar i analysen av säkerhet efter förslutning. Tillförda saltmängder blir då små. De hamnar dessutom inte som avlagringar på kapseln.



## Ytterligare scenarier (1/2)

- Huvudscenariot ”läror oss” vilka typer av påfrestningar förvaret utsätts för
- Kan påfrestningarna bli värre än i huvudscenariot?
- Systematisk utredning av ytterligare scenarier för att studera detta
- Exempel: En is ovan förvaret gör att kapslarna kan utsättas för höga tryck och eventuellt skadas. Inga sådana skador i huvudscenariot – men:
  - Kan isen bli tjockare och därmed trycket högre än i huvudscenariot?
  - Kan bufferten ge högre tryck på kapseln än i huvudscenariot?
  - Missade tillverkningsfel i kapselns insats?
- I ett ”tryckscenario” analyserar vi sådana frågor
  - Utvärderar på så sätt **osäkerheter** som inte togs hänsyn till i huvudscenariot
  - Målet: Att utröna om kapslar på *något* sätt kan skadas av höga tryck

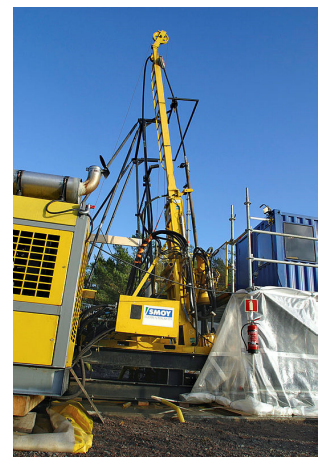


## Ytterligare scenarier (2/2)

- Motsvarande analys för kapselskador orsakade av
  - Korrosion av kopparhöljet – **Korrosionsscenario**
  - Jordskalv – **Jordskalvsscenario**
- I varje scenario analyseras hela systemet – med fokus på den typ av kapselskada som scenariot handlar om
- Om kapslar går sönder i ett scenario
  - Vi beräknar vilka konsekvenserna blir för omgivningen
    - Frigörelse av radionuklider från bränslet och utsläpp ur den skadade kapseln
    - Transport av radionuklider i berget
    - Spridning i biosfären och dos till människa
  - Scenariot bidrar till den totala riskbilden för förvaret
- Kombinationer av scenarierna analyseras också

## Intrångsscenarier (1/2)

- Analyser av scenarier med oavsiktliga mänskliga intrång i berget
  - Ingår "traditionellt" i säkerhetsanalyser och krävs också i SSM:s föreskrifter
  - Ska inte inkluderas i risksummeringen för förvaret enligt SSM:s föreskrifter; subjektivt valda scenarier där reell risk inte låter sig kvantifieras
  - Avsiktliga intrång analyseras inte i enlighet med internationell konsensus – blir rena spekulationer
- Sannolikheten för intrång reduceras genom
  - att välja berg fattigt på exploaterbara resurser,
  - att förlägga förvaret på avsevärt djup – ca 500 m, samt
  - informationsbevarande



## Intrångsscenarioer (2/2)

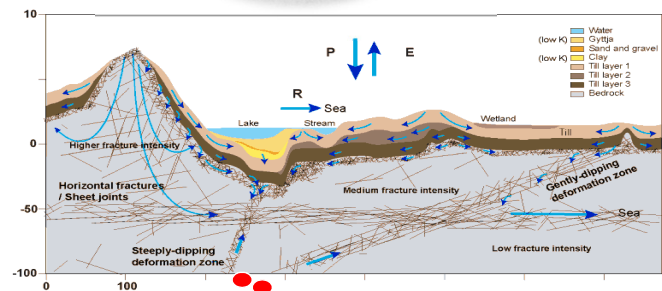
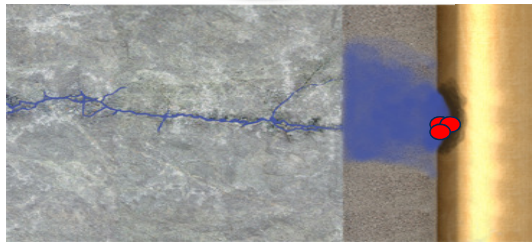
- Oförslutet förvar (fall som krävs explicit i allmänna råd till SSM:s föreskrifter)
  - Antar att deponeringstunnlar är återfyllda och förslutna, men inte transporttunnlar och schakt/ramp
  - Deponerat bränsle omges då av de viktigaste barriärerna
  - Begränsad omgivningspåverkan men visar att det är viktigt att slutföra förvarsprojektet enligt plan
- Indirekt påverkan av t ex tunnelbygge eller gruvsdrift i berget
  - "Samlingsscenarioer" som täcker in en rad möjliga aktiviteter; begränsad påverkan på framför allt flödet i berget
- Direkt genomborring av en kapsel från ytan – analyserar
  - Konsekvenser för borrhälspersonal som exponeras för bränsle; kan bli mycket höga initialt
  - Konsekvenser för närboende som använder borrhålet som brunn; kan bli höga initialt
  - Förvarets skyddsförmåga efter intrånget; begränsad effekt
- Jordströmmar orsakade av större elektriska installationer, t ex kraftöverföringskablar
  - Begränsade effekter i form av korrosion på kapseln, även med pessimistiska antaganden



## Två scenarier där vi inte kan utesluta att kapslar skadas: 1) Korrosion i kombination med erosion av bufferten

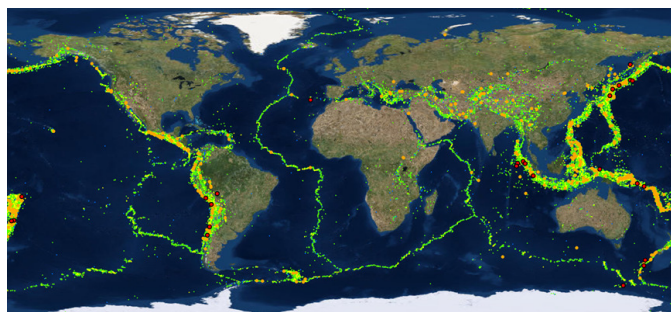
- Den skyddande lerbufferten kan eroderas under de begränsade tider som förvaret utsätts för grundvatten med låg salthalt, t ex under glaciärsmältning
- Om tillräckligt mycket lera eroderas ligger kapseln oskyddad och blir mer utsatt för korrosionsangrepp från grundvattnet
  - Det tar tiotusentals år innan en sådan situation uppstår – och då bara i de mest utsatta kapselpositionerna
- Sulfid i grundvattnet korroderar därefter kapseln snabbare än om bufferten finns kvar
- Efter ytterligare typiskt 100 000-tals år kan det inte uteslutas att någon av de mest utsatta kapslarna genombryts av korrosionen
  - Detaljerad statistisk utvärdering baserad på flöden och sulfidhalter i förvaret
- Radionuklider kan då tränga ut och spridas till ytan med grundvattnet

## Erosions-/korrosionsscenarioet



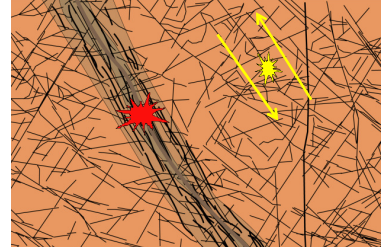
## Två scenarier där vi inte kan utesluta att kapslar skadas: 2) Skalvscenariot

- Sverige befinner sig i ett tektoniskt lugnt område. Förvarplatsen är dessutom belägen i det inre av en tektonisk lins, vilket gör att de mekaniska förhållande varit stabila under mycket lång tid.
- I riktigt långa tidsperspektiv kan dock större jordskalv nära förvaret inte helt uteslutas, särskilt inte i samband med isavsmältningar.
  - Olika experter gör olika bedömningar av frekvensen av sådana stora skalv.
  - Vi har ställt samman bedömningar från ledande experter och pessimistiskt valt den högsta frekvensen.



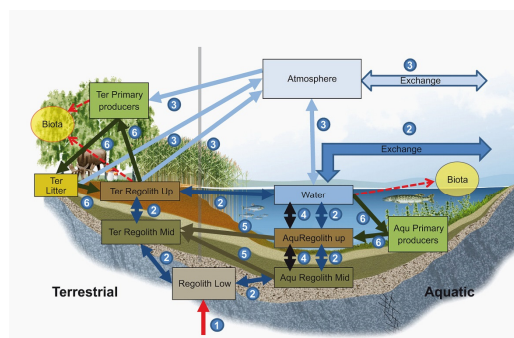
## Två scenarier där vi inte kan utesluta att kapslar skadas: 2) Skalvscenariot forts

- Skalven kan bara ske i stora sprickzoner där inga kapslar placeras ("respektavstånd" till zoner)
  - Genom platsundersökningarna har vi god kontroll på utbredningen av dessa
- Vi antar i säkerhetsanalysen pessimistiskt att värsta möjliga skalv sker i den "värst" belägna sprickzonen i försvarsområdet
- Skalvrörelsen fortplantas ut i omgivande berg och kan då innebära en påfrestning, särskilt på kapslar närmast den stora sprickzonen
  - Kapseln dimensioneras för att tåla relativt stora fortplantade rörelser
  - Kriterier för att minimera risk för kapselskador då deponeringspositioner väljs
  - Dock kan vi idag inte helt utesluta att skalvinducerade skador kan uppstå
- *Den statistiskt beräknade sannolikheten för att samtliga kapslar förblir oskadda av jordskalv också i ett miljonårsperspektiv är mer än 90 %*
  - *Sannolikheten att någon kapsel skadas är därmed mindre än 10 %*

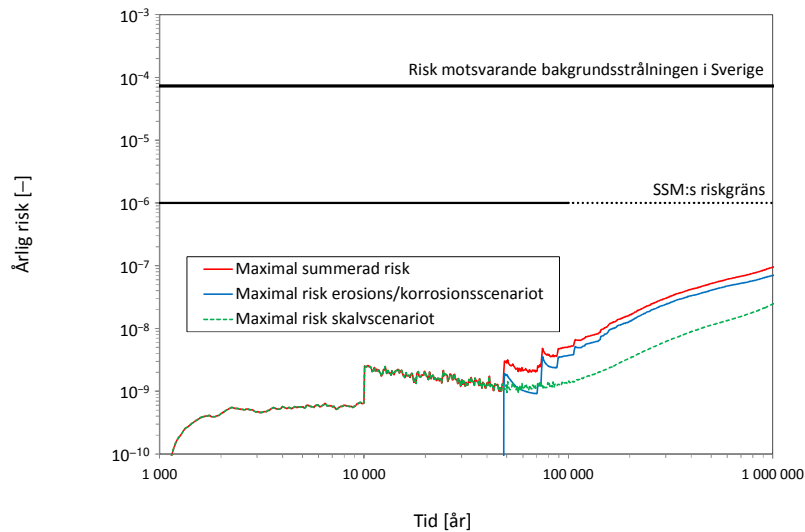


## Resultat

- Även med flera pessimistiska antaganden är det mest troliga utfallet av analysen att inga kapslar skadas, ens i ett miljonårsperspektiv.
  - Det kan sägas vara förväntat att designen håller för påfrestningarna – säkerhetsanalysen har genomförts ett antal gånger och resultaten från en analys används till att förfinas och förbättra förvaret.
- Kan dock inte helt utesluta att enstaka kapslar skadas till följd av erosion/korrosion eller jordskalv i ett miljonårsperspektiv.
- För dessa två scenarier beräknas utsläpp av radionuklider till omgivande berg, spridning i berg och biosfär samt dos till människor som antas leva på naturliga resurser i förvarets närhet. Doserna omvandlas till risk för hälsoeffekter (cancer och ärftliga skador) med den koefficient som anges i SSM:s förfkrifter.



## Risikurvor för de två bidragande scenarierna



## Övergripande slutsats i SR-Site

- Den sammanlagda risken för skadeverkningar hos maximalt utsatta individer från ett slutförvar i Forsmark hamnar med marginal under SSM:s riskkriterium även på en miljon års sikt
- Den huvudsakliga slutsatsen i SR-Site är därför att ett KBS-3-förvar i Forsmark som utformas enligt ansökan blir långsiktigt säkert
- Detta var också den huvudsakliga frågan för projektet SR-Site

## Ytterligare slutsatser

- Använder också andra säkerhetsindikatorer än risk, t ex naturliga flöden av radionuklider från berget till ytan
  - De beräknade utsläppen i våra scenarier domineras av naturligt förekommande Ra-226
  - Det naturliga flödet av Ra-226 i Forsmark idag är cirka 100 gånger högre än våra beräknade utsläpp långt fram i tiden
- Påverkan på miljön: Försumbar påverkan även på andra organismer än människa
- Säkerhetsanalysen ger också underlag till
  - Forskningsprogram för viktiga processer för säkerhetsanalysen
  - Detaljutformning av KBS-3-systemets barriärer
  - Platsstudier

## Tilltro till resultat

- Långsiktigt **stabil och gynnsam miljö på förvarsdjup** i Forsmark – låg frekvens av vattenförande sprickor, gynnsam geokemisk miljö, stabil berggrund
  - platsmodell baserad på geovetenskapliga tolkningar av data från många års undersökningar av förhållanden på djupet
- Tillräckligt **beständiga material** (koppar och bentonitlera) för de tekniska barriärerna
  - detaljerade specifikationer av de tekniska barriärerna och demonstration av hur de kan tillverkas och kvalitetssäkras
- Vetenskaplig **kunskapsbas** för säkerhetsanalysen, uppbyggd genom decenniers forskning och utveckling
  - Tillämpning av en systematisk analysmetodik
  - Kvalitetssäkring av analysens dokument, bl a genom granskning av utomstående vetenskapliga experter

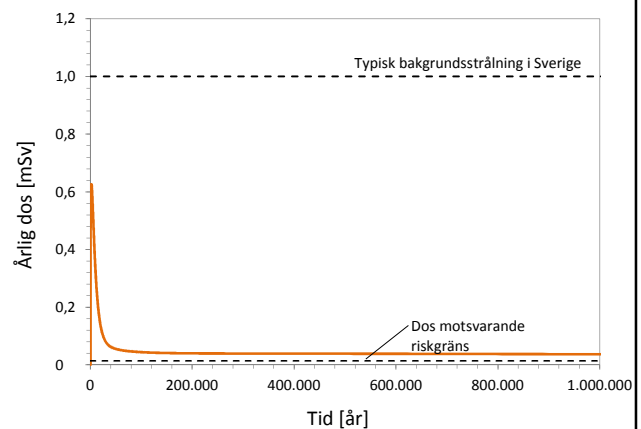


## Avslutningsvis ett "riskperspektiv" (1/2)

- Vetenskapliga evidens, platsens egenskaper etc säger att den överväldigande majoriteten kapslar kommer att hålla under den en miljon år långa analysperioden.
- Ändå intressant att fråga t ex: Vad skulle hända om alla kapslar hypotetiskt hade en genomgående skada, dvs ett hål i kopparhöljet, redan vid deponeringen?
  - Helt orealistiskt fall, men sätter risker med förvaret i perspektiv.
  - Fallet är också i linje med SSM:s föreskrifter som anger att betydelsen av enskilda barriärer och barriärfunktioner ska analyseras.

## Avslutningsvis – ett "riskperspektiv" (2/2)

- Doser i nivå med bakgrundsstrålningen
  - för de mest utsatta individerna i förvarets närhet
  - förutsatt att de lever av lokala resurser
  - under cirka 1 % av analys tiden
  - förutsätter tempererat klimat
- Hypotetiskt fall med oacceptabla konsekvenser i legal mening
  - Men ur hälsosynpunkt för det lilla antalet drabbade troligen knappt mätbart
  - Förvaret är alltså i denna mening robust också för ett helt realistiskt scenario





## OECD:s kärnenergibyrå NEA har granskat SR-Site (1/2)

- OECD:s kärnenergibyrå NEA har mångårig rutin för att granska analyser av förvar för kärnavfall
- Panel av internationella experter sätts samman och granskar under ett år, med flera omgångar skriftliga frågor, en veckas hearing och skriftlig slutrapport
- På miljödepartementets begäran granskades stora delar av säkerhetsanalysen SR-Site

## OECD:s kärnenergibyrå NEA har granskat SR-Site (2/2)

- Granskning pågick maj 2011 – juni 2012
- Huvudsaklig slutsats: *”Utifrån ett internationellt perspektiv är SKB:s analys av långsiktig strålsäkerhet, SR-Site, tillräckligt och trovärdigt för det aktuella tillståndsbeslutet. SKB:s kärnbränsleprogram är ett moget program – det är samtidigt innovativt och tillämpar bästa möjliga teknik – och är kapabelt att i princip uppfylla de industriella och säkerhetsrelaterade krav som är relevanta för nästa steg i tillståndsprövningsprocessen.”*
- Gav också synpunkter på vad som bör göras i nästa steg av SKB:s program



## Sammanfattning (1/2)

- Tidsperspektivet för säkerhetsanalysen är en miljon år
- Samhället (SSM) kräver att påverkan från förvaret under denna tid är omkring en procent av den från bakgrundsstrålningen
- Osäkerheter om framtiden hanteras ofta med pessimistiska antaganden där "värsta" fall används. Statistiska metoder används där så är befogat
- Istider ger i allmänhet de största påfrestningarna på förvaret – men dessa är oerhört mycket mindre än effekterna på ytan
- I säkerhetsanalysen SR-Site är pessimistiskt bedömda risker för ett slutförvar i Forsmark maximalt cirka en tiondel av SSM:s riskgräns
- Den huvudsakliga slutsatsen i SR-Site är därför att ett KBS-3-förvar i Forsmark som utformas enligt ansökan blir långsiktigt säkert

## Sammanfattning (2/2)

Hur är det möjligt att säga något om säkerheten på t ex 100 000 års sikt?

- Förlägg förvaret till en miljö, det djupa urberget, som varit stabil under mycket lång tid
- Gör förvarets barriärer av naturliga material som är långsiktigt stabila i den miljö som råder i urberget
- Dimensionera mot alla kända förändringsprocesser
- Tilltro till resultatet genom
  - Mer än 40 års forskning, utveckling och demonstration
  - 10 års ytbaserade undersökningar av platsen
  - Systematisk säkerhetsanalys förenlig med föreskrifter och internationell praxis