

Vad kan
klimatanpassningen
lära av kärnbränsle-
hanteringen?

Jens-Ove Näslund

Docent i naturgeografi (glaciologi, klimat, geomorfologi), Stockholms universitet
Tidigare Adj. Prof. Miljöriskanalys Stockholms universitet

Koordinator klimatforskningsprogrammet vid Svensk Kärnbränslehantering

Bitr. analysledare Kärnbränsleförvaret

SKB:s uppdrag

Oavsett frågan om framtida kärnkraft finns kärnavfall idag från driften av de Svenska kärnkraftverken.

Avfallet behöver tas omhand för att skydda människa och miljö. En mycket omfattande uppgift - ett av Sveriges största miljöskyddsprojekt

Svensk lag: De svenska kärnkraftsproducenterna ska stå för alla kostnader för att ta hand om och slutförvara kärnavfallet.

1973 bildade kärnkraftsbolagen Svensk Kärnbränslehantering specifikt för det här uppdraget. Ägs av Vattenfall AB, E.ON Kärnkraft Sverige AB, Oskarshamns Kärnkraftsgrupp AB och Forsmarks Kraftgrupp AB.



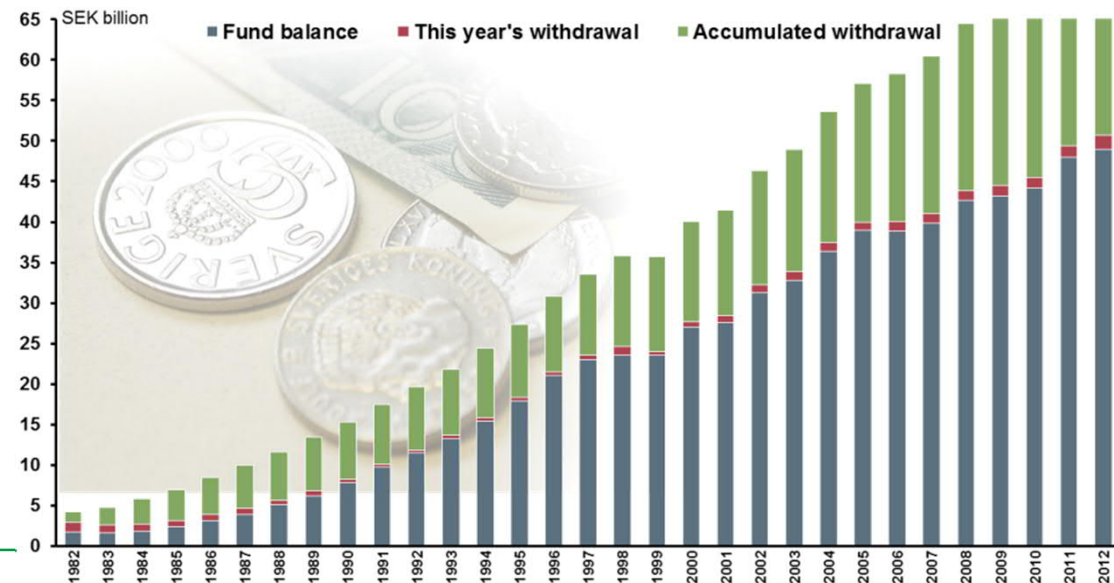
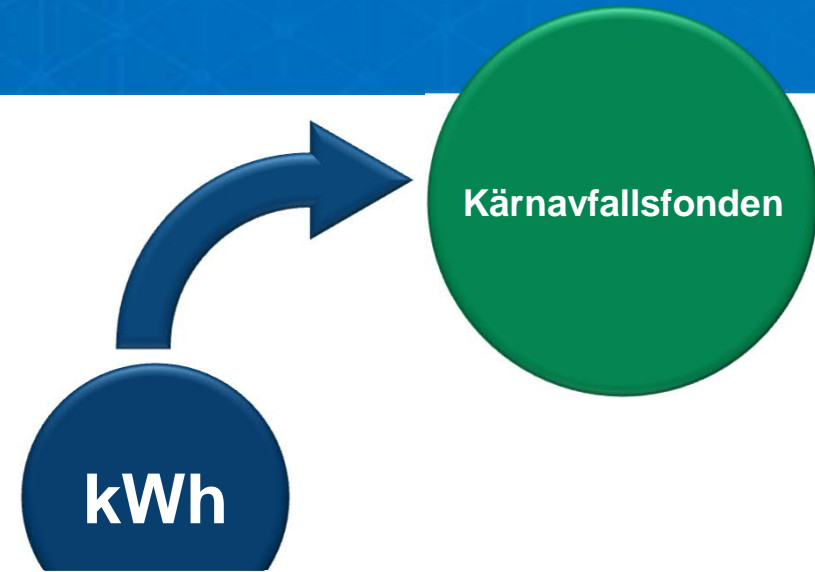
Finansiering

Mitten av 1970-talet: kärnkraftsbolagen skapade Kärnavfallsfonden. Fonderar ca 4 öre per kWh kärnkraftsel.

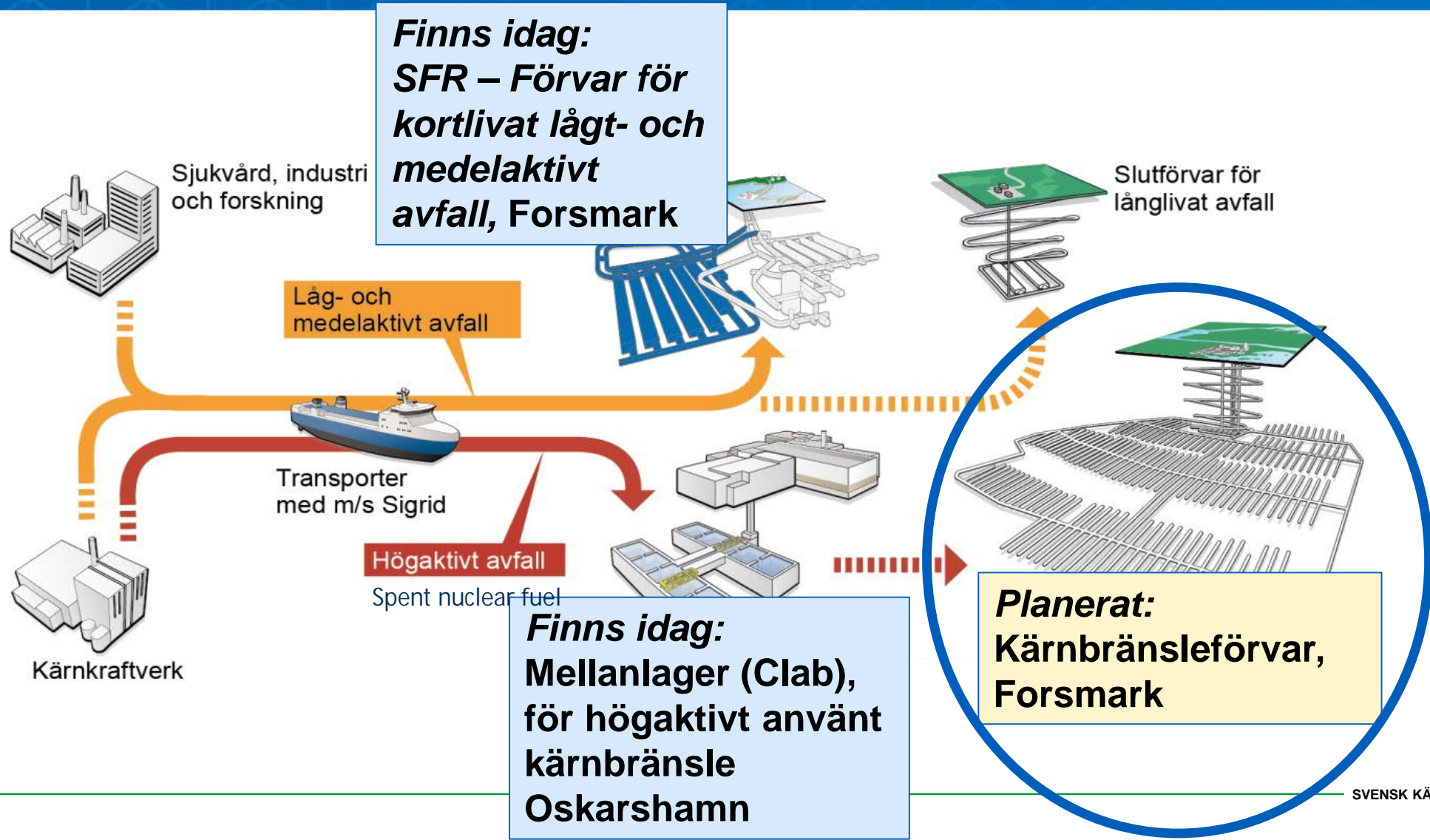
Hela SKB:s verksamhet bekostas av kärnkraftsbolagen och elkonsumenterna

Omhänderta allt kärnavfall i Sverige, rivning av kärnkraftverk

2021: ca 80 miljarder kr



SKB:s system för att göra detta

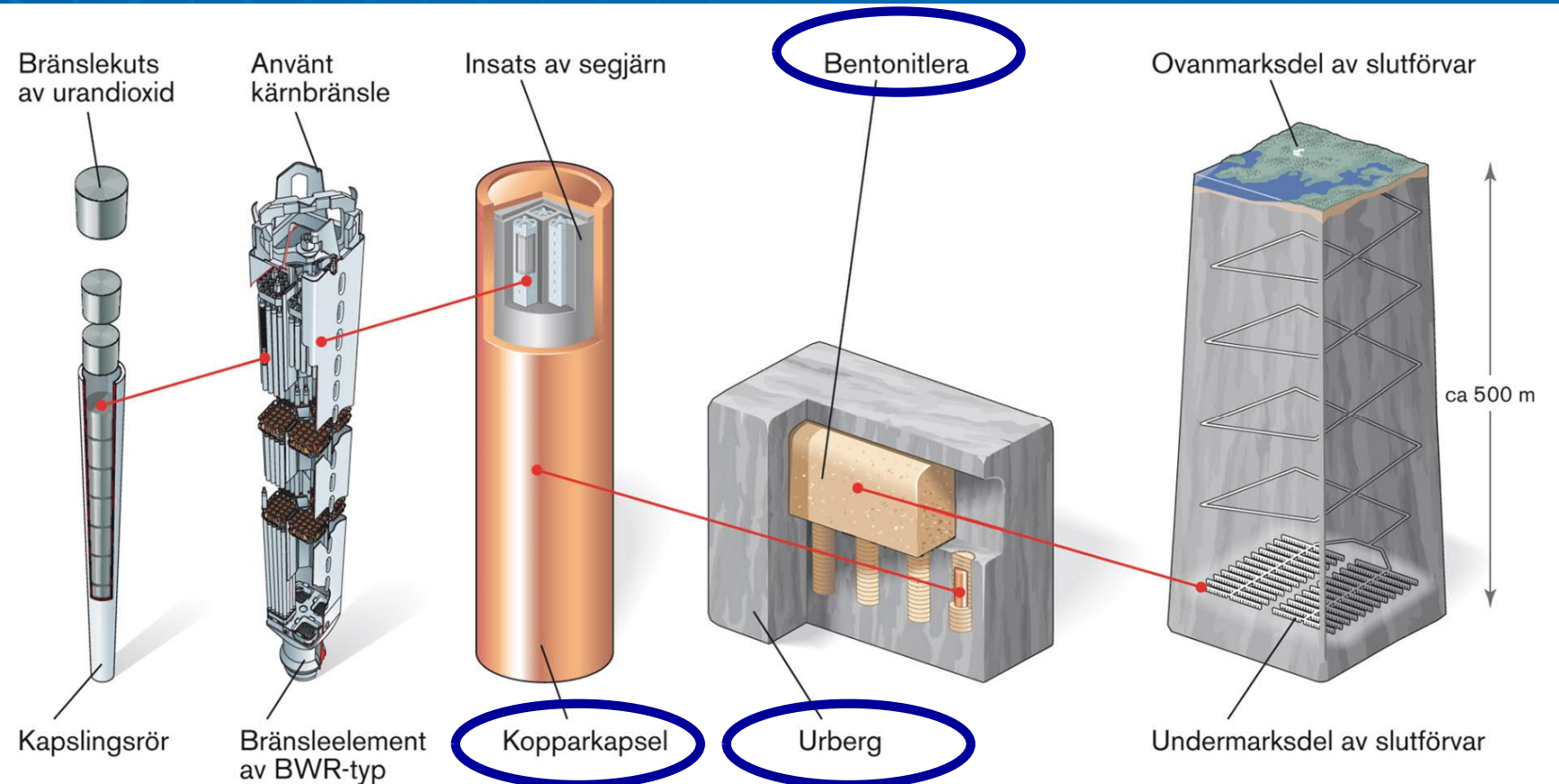


Kärnbränsleförvaret – KBS-3 metoden

Tre säkerhetsbarriärer

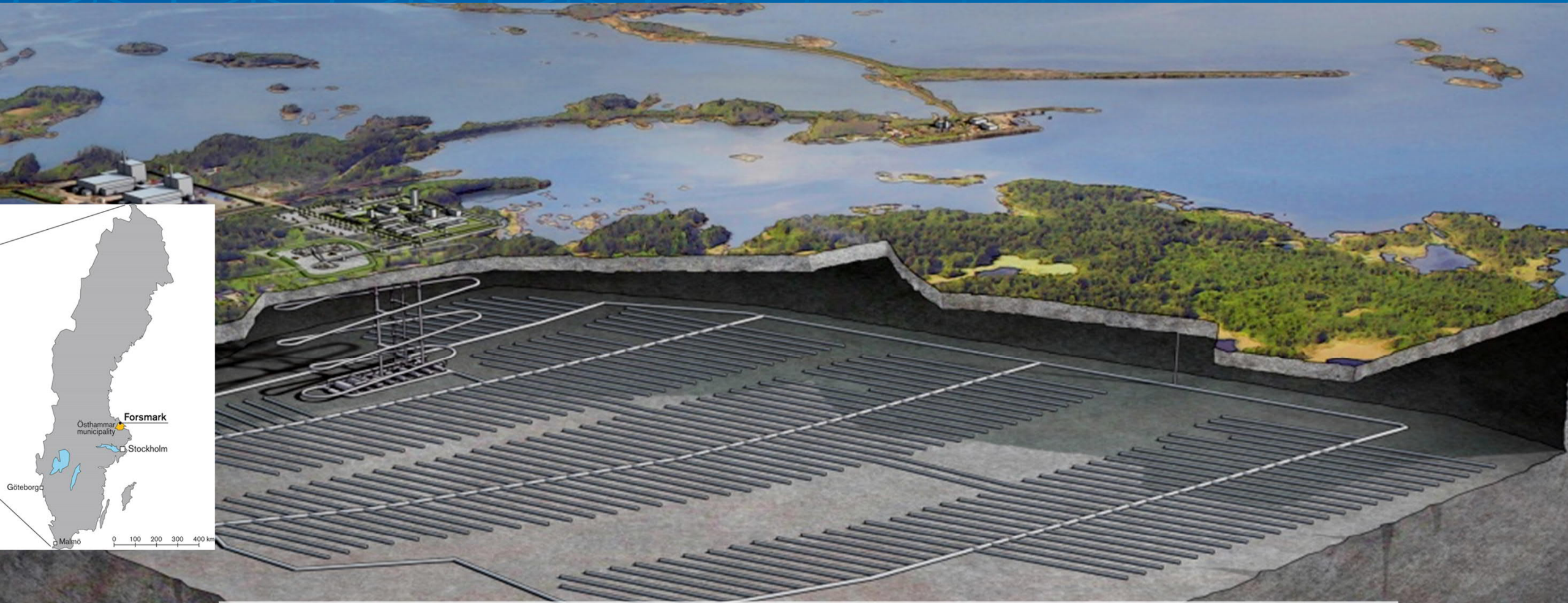
Två säkerhetsfunktioner

- fullständig isolering
- fördröjning



De tre barriärernas ger tillsammans en större säkerhet/robusthet än om man haft enbart en barriär

Planerat Kärnbränsleförvar i Forsmark



**Allt avfall från ca 50 års drift av alla nuvarande svenska reaktorer
450 m djup, 4 km²**

Var står vi i dag?

Nu pågår tillståndsprövningarna för slutförvarssystemet för använt kärnbränsle

Granskning av SKB:s ansökningar görs av **Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM)** som prövar enligt **kärntekniklagen Mark- och miljödomstolen** utifrån **miljöbalken**

27 Januari 2022: Regeringen godkände ansökan för Kärnbränsleförvaret (metod och plats) och inkapslingsanläggning

Regeringsbesluten är inte slutet på tillståndsprocesserna, utan början på nästa fas. Frågan går nu tillbaka till SSM och MMD som ställer **villkor** för anläggningarna.

Fortsatt stegvis prövning av SSM om SKB uppfyller gällande krav på strålsäkerhet:

Nästa steg: Tillstånd för att börja bygga, Nästa steg: tillstånd provdrift, Nästa steg: tillstånd reguljär drift. Sen fortsatta regelbundna avstämningar under hela driftsperioden (ca 40 år).

1. Operativ tidshorisont: Bygg- och driftsperiod

Driftsperiod från ~2040 till ~2080: ca 40 år

Löpande utvärdering av tex geologiska förhållanden allt eftersom förvaret bit för bit byggs ut. Kontinuerlig verifiering av våra geologiska modeller av hur förhållandena ser ut i berget. Bekräfta eller ompröva bilden av förvarsdjup, deponeringstunnlars läge och orientering, enskilda deponeringshåls lägen.

Dvs frågan om förvarets detaljerade layout kan inte lösas helt på "förhand".

Efter driftsperioden försluts förvaret och inget ytterligare aktivitet sker.

2. Tid efter förslutning - långsiktig säkerhet

Analystiden styrs av Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter:

SSM: ”För ett slutförvar för använt kärnbränsle, eller annat långlivat kärnavfall, bör riskanalysen åtminstone omfatta cirka hundrausen år eller tiden för en glaciationscykel för att belysa rimligt förutsägbara yttre påfrestningar på slutförvaret. Riskanalysen bör därefter utsträckas i tid så länge som den tillför betydelsefull information om möjligheten att förbättra slutförvarets skyddsförmåga, dock längst för en tidsrymd upp till en miljon år.”

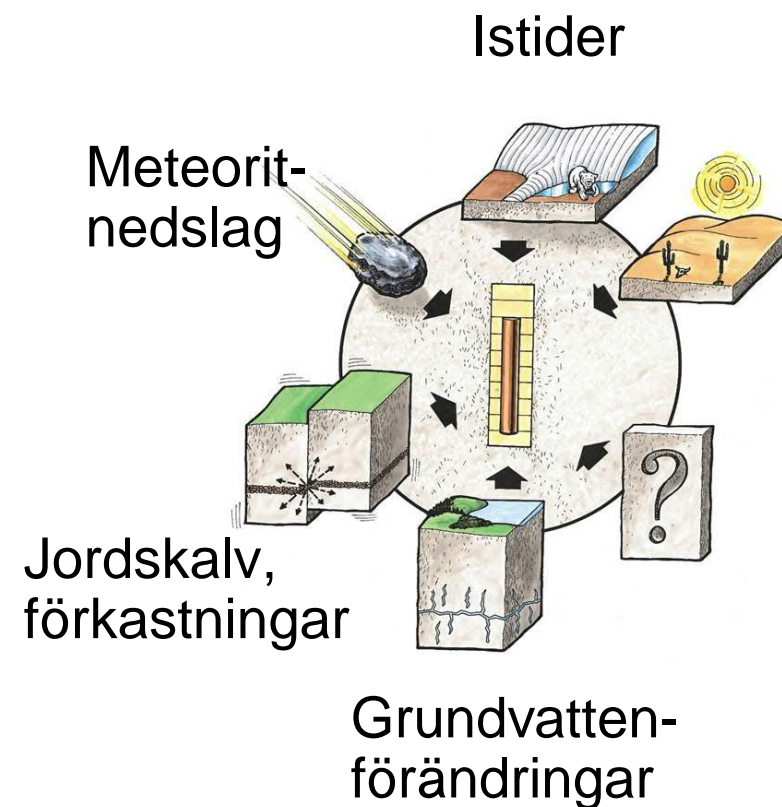
SKB:s säkerhetsanalyser för Kärnbränsleförvaret har en total analystid på miljon år. Risken kvantifieras för hela perioden.

Efter 100 000 år har strålningen minskat till ungefär samma nivå som från motsvarande mängd uranmalm. 100 000 år motsvarar ungefär en istidscykel.

Syftet är att bedöma den långsiktiga säkerheten för ett KBS-3-förvar vid Forsmark för att visa om det går att bygga ett säkert förvar eller inte.

1. Kan någonting i förvarets och omgivningens långsiktiga utveckling leda till att kapslar skadas?

2. Vilka blir i så fall konsekvenserna?



Myndighetskrav - riskkriterium

Vad betyder "ett säkert förvar"?

Strålsäkerhetsmyndigheten kräver i sina föreskrifter uppfyllelse av ett väldefinierat *riskkriterium*:

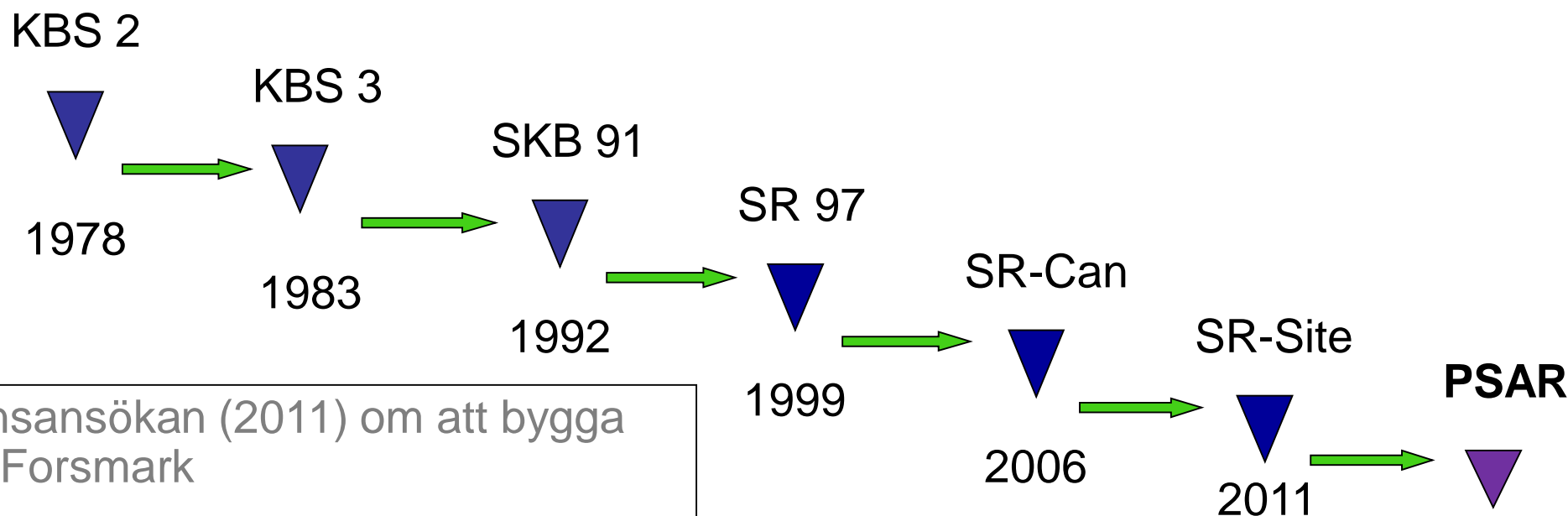
"Den årliga risken för skadliga effekter (cancer eller ärftliga skador) får inte överskrida en på en miljon (10^{-6}) för en representativ individ i gruppen utsatt för störst risk"

Gränsen motsvarar en effektiv dosgräns på $\sim 1.4 \cdot 10^{-5}$ Sv/yr

Motsvarar $\sim 1\%$ av risken från den naturliga bakgrundsstrålningen i Sverige

För att få licens, tillstånd för byggstart, tillstånd för driftstart krävs att SKB kan visa att förvaret inte överskrider riskkriteriet. **SKB sätter inte sin målbild själv.**

SKB:s säkerhetsanalyser för Kärnbränsleförvaret



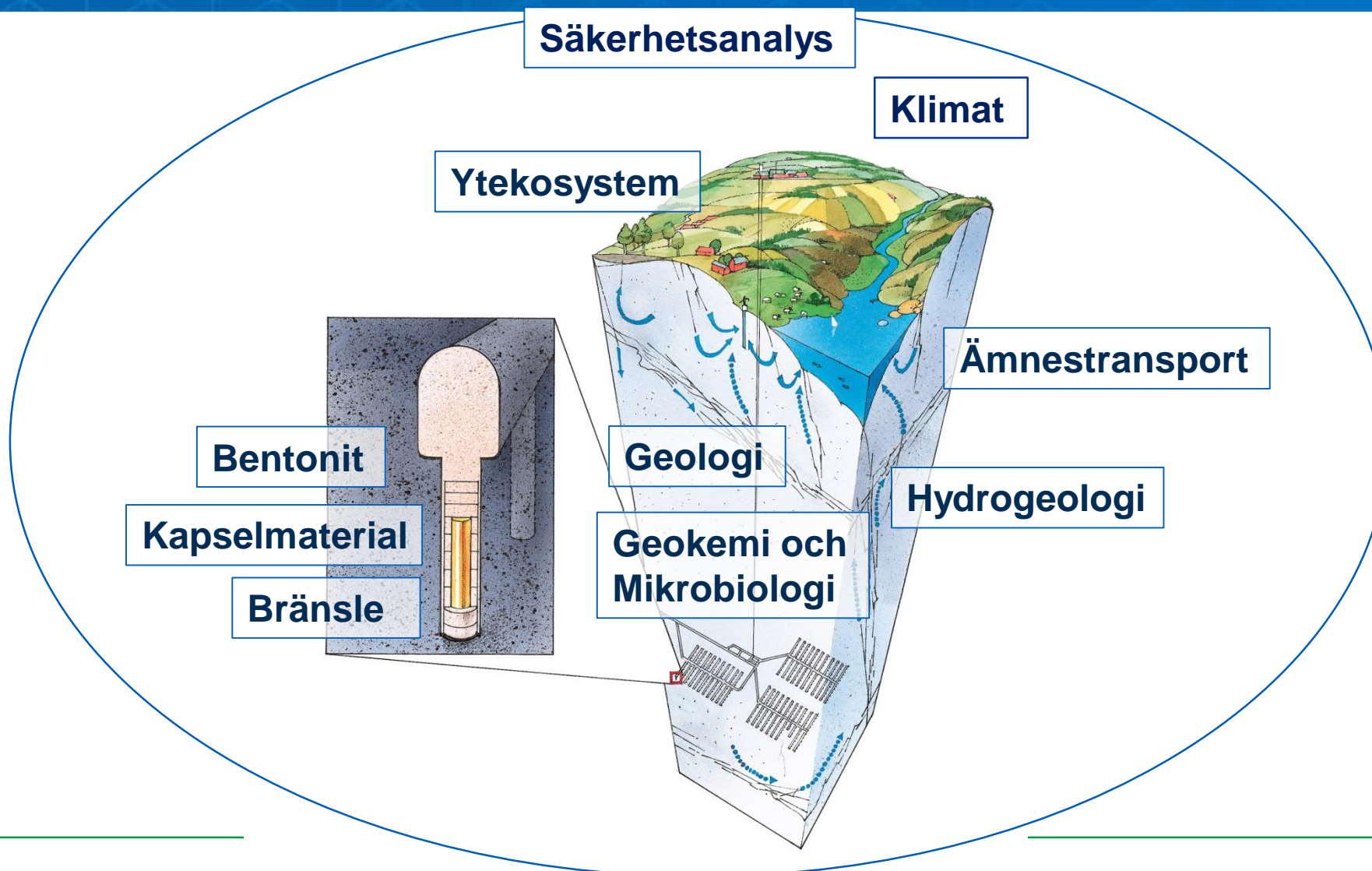
SR-Site: Licensansökan (2011) om att bygga ett slutförvar i Forsmark

PSAR: Ansökan om byggstart

SAR: Ansökan om drift

Varje ansökan inkluderar en analys av säkerhet efter förslutning

Vilka ämnesområden inkluderas i en säkerhetsanalys?



Säkerhetsanalys kärnbränsleförvaret

1. Kan någonting i förvarets eller omgivningens långsiktiga utveckling leda till att kapslar skadas?

2. Vilka blir i så fall konsekvenserna?

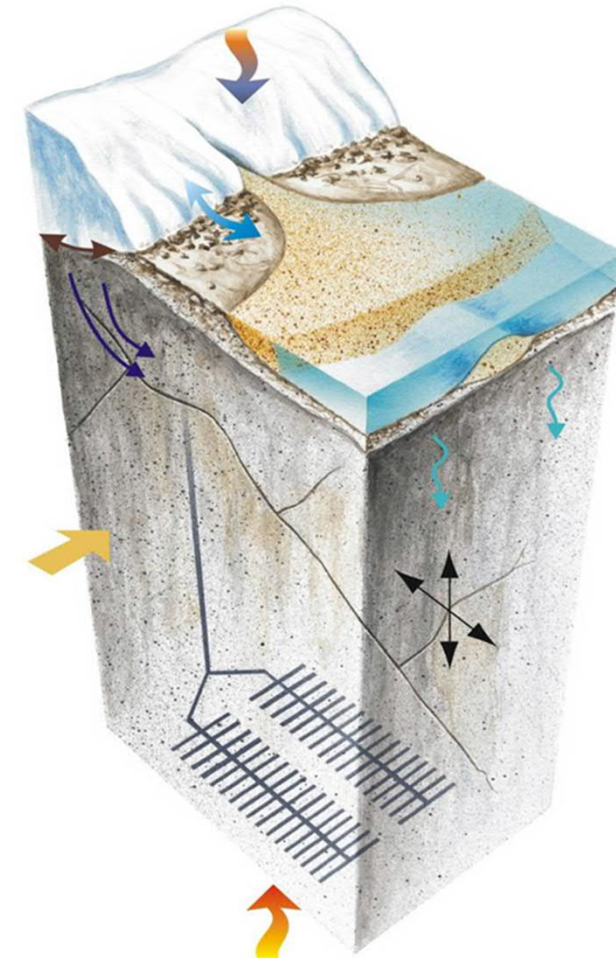
1. Kan förändras eller påverkas under analysperioden:

klimatet, kopparkapseln, bentonitleran, grundvattenflöde, grundvattnets kemiska sammansättning. Analyseras med simuleringar för ett stort antal olika scenarier.

2. För de fall då kapslar går sönder görs simuleringar av

Transport av radionuklider från förvaret till markytan, **Fördröjningsegenskaper** hos berget, **Ansamling av radionuklider** i sediment vid markytan, **dosberäkningar** (mark- och vattenanvändning)

Doserna konverteras till riskbidrag, vilka vägs samman i en **kvantitativ risksummering. Jämförs med riskkriteriet.**



Hantering av osäkerheter i säkerhetsanalyser



Hantering av osäkerheter är en central del av säkerhetsanalysen, integrerad i metodiken. Osäkerheter av olika slag finns förknippade med alla aspekter av förvarets och omgivningens utveckling.

En grundtanke i metodiken är att nå en heltäckande hantering av alla relevanta osäkerheter (inga lösa trådar): identifiera, klassificera och beskriva osäkerheter, liksom att hantera dem på ett konsekvent sätt i analysen av förvarets utveckling

Olika typer av osäkerheter:

- Systemosäkerheter
- Scenariოსäkerheter
- Modell- och dataosäkerheter

Systemosäkerheter



Är alla faktorer av betydelse identifierade och inkluderade i analysen?

FEP-analys

Features, events and processes (egenskaper, händelser och processer)

Systematisk genomgång av allt som potentiellt skulle kunna påverka förvaret.

Vissa kan uteslutas (behöver motiveras tydligt), medan andra tas om hand och inkluderas i analysen.

NEA (Nuclear Energy Agency) fep-listor, nationella fep-listor

Visa och dokumentera att alla osäkerheter på den här nivån är omhändertagna. Kvalitetssäkring.

SR-Site (SR-Can) FEP Cli05 Climate related issues - Development of permafrost

NEA FEP	Aspects of the FEP addressed:	Aspects of the FEP not addressed because:	Comments
A 2.30 Glaciation	Permafrost could affect rock and groundwater flow characteristics.		Aggradation and degradation of permafrost and its potential impact on repository are covered.
A 2.38 Isostatic rebound	The presence of ice sheets may compress the underlying rock.		Altered pressures and compression of the bedrock are considered in calculations of glacial frozen depth. Changes in relative level are considered.
H 3.1.2 Climate change: Natural J 5.17 Permafrost	Seasonally and permanently frozen ground. Permafrost in Sweden in a glacial time scale. Current occurrence of permafrost. Relationship between mean annual air temperature and permafrost depth. Effect of surface conditions on development of permafrost. Effect of geothermal heat flow on development of permafrost. Potential subsurface effects of permafrost. Temperature gradients.	Groundwater flow in areas of permafrost. Accumulation of gas and radionuclides below the lower surface of the permafrost. Groundwater flow, accumulation of gas and radionuclides are not external processes.	See also SKB FEP Ge02, Ge03 and Ge04
K 10.13 Permafrost	Development of permafrost and its dependence on surface temperature and conditions and geological conditions. Current occurrence of permafrost. Possible permafrost depths given defined surface and subsurface conditions. Active layer, groundwater recharge/discharge in unfrozen zones, "taliks".		

**Osäkerhet i hur utvecklingen kommer att se ut för en visst system eller parameter över tid.
Omhändertas genom analys av ett flertal scenarier**

Exempel: osäkerhet i klimatutveckling:

1. Identifiering av klimat och klimatrelaterade processer av vikt för långsiktig säkerhet
2. Identifiera och beskriva det spann inom vilket de kan variera i framtiden vid förvarsplatsen
3. Konstruktion av en uppsättning klimatscenarier som täcker spannet
4. Använda klimatscenarierna som bas för efterföljande analyser i säkerhetsanalysen

Metodiken beskrivs i:

Näslund J O, Brandefelt J, Claesson Liljedahl L, 2013. Climate considerations in long-term safety assessments for nuclear waste repositories. *Ambio* 42(4):393-401.

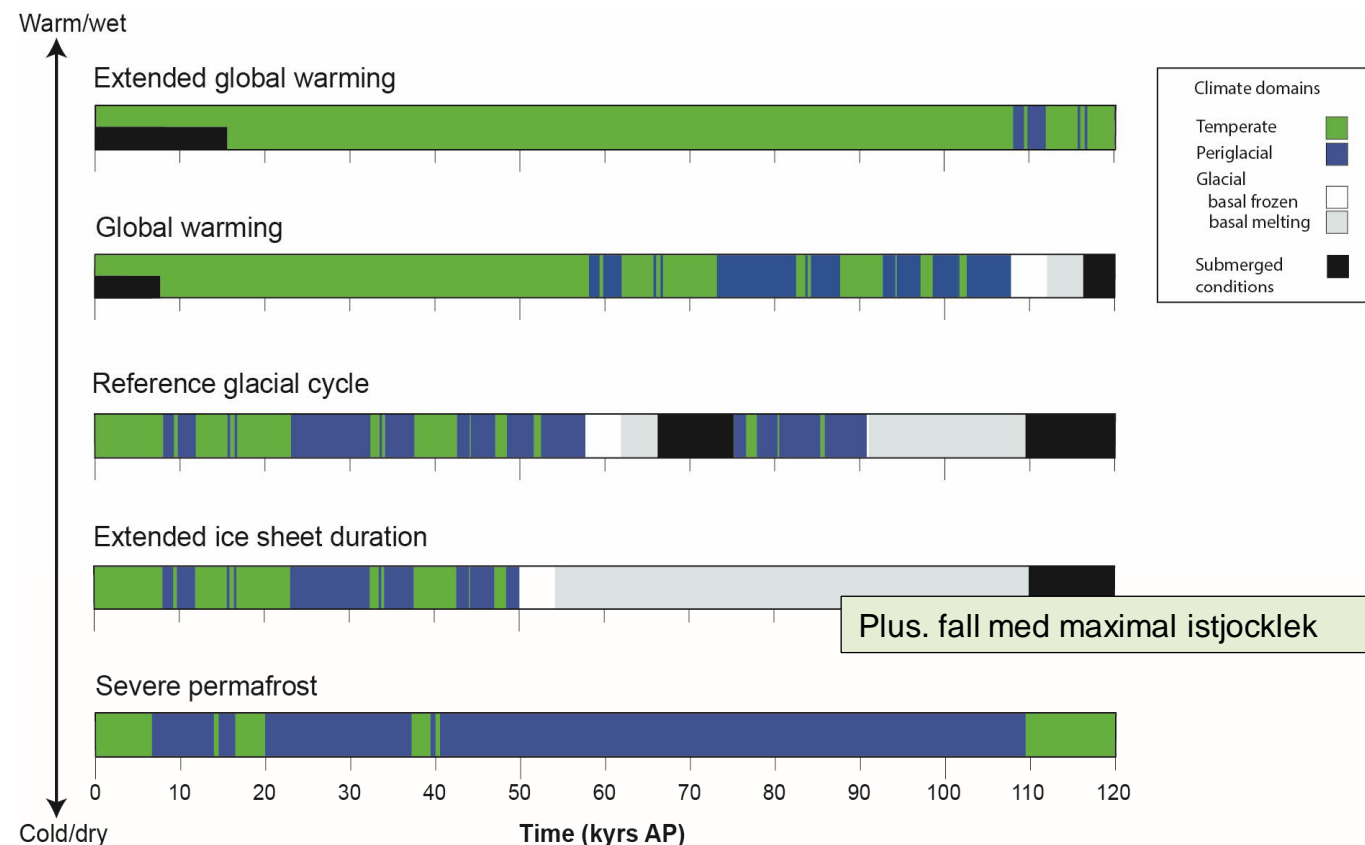
Scenarioosäkerheter

Varma klimat till kalla klimat, och de olika processer som kan ske givet dessa klimat

Totalt sex klimatscenarier täcker in osäkerheten i framtida klimatutveckling på tidsskalorna 100 000 och en miljon år

Exempel på klimatutvecklingar och Gränssättande fall för en viss process

I analysen för Kärnbränsleförvaret sannolikhetssetts inte de olika klimatscenarierna



Från:
SKB 2020. Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark – Climate and climate-related issues, PSAR version. SKB TR-20-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pessimistiska antaganden

Ett vanligt sätt att hantera osäkerheter i säkerhetsanalysen är att tillämpa pessimistiska antaganden i beräkningarna. Försäkra sig om att risken från förvaret inte underskattas.

Om osäkerheten är stor för en process eller parameter inkluderas fall med störst negativ påverkan.

Exempel: maximal tryck på kapslarna (sker vid istid/glaciation). Väljer att analysera fall med tjockast tänkbara inlandsis, simulerad med pessimistiskt valda parametrar.

Kan ibland vara svårt att veta om ett antagande faktiskt är pessimistiskt eller inte.

Havsnivå och strandlinjeförskjutning



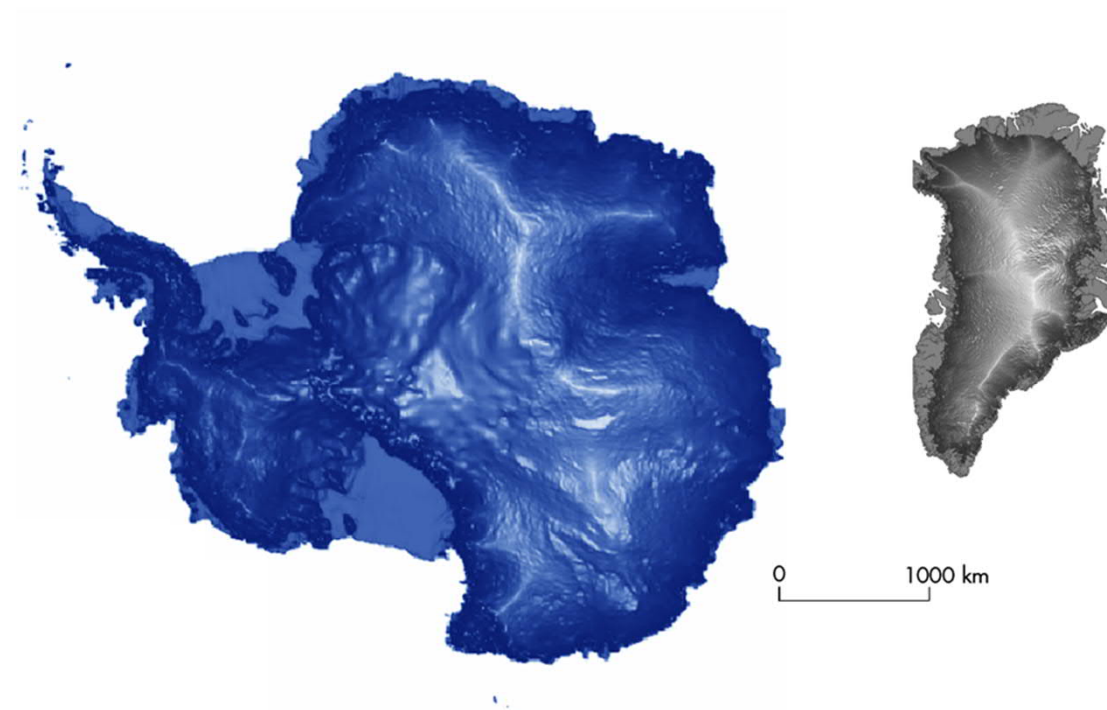
Variationer på kort sikt (2100 AD)

~driftsperioden för Kärnbränsleförvaret
(öppet förvar)

Informationen behövs som konstruktionsförutsättning för att utforma förvarsplatsen och ovanmarks-konstruktioner för att stå emot höga havsnivåer under driftstiden.

Variationer på lång sikt (kommande 10 000 åren och längre)

Säkerhetsanalys: variationer i havsnivå och strandlinjeförskjutning - nödvändig bland annat för simulering av landskapsutveckling och geokemi på Forsmarksplatsen



Exempel riskhantering: Höjning relativ havsnivå fram till 2080 (förslutning)

Pessimistiskt val av utsläppsscenario

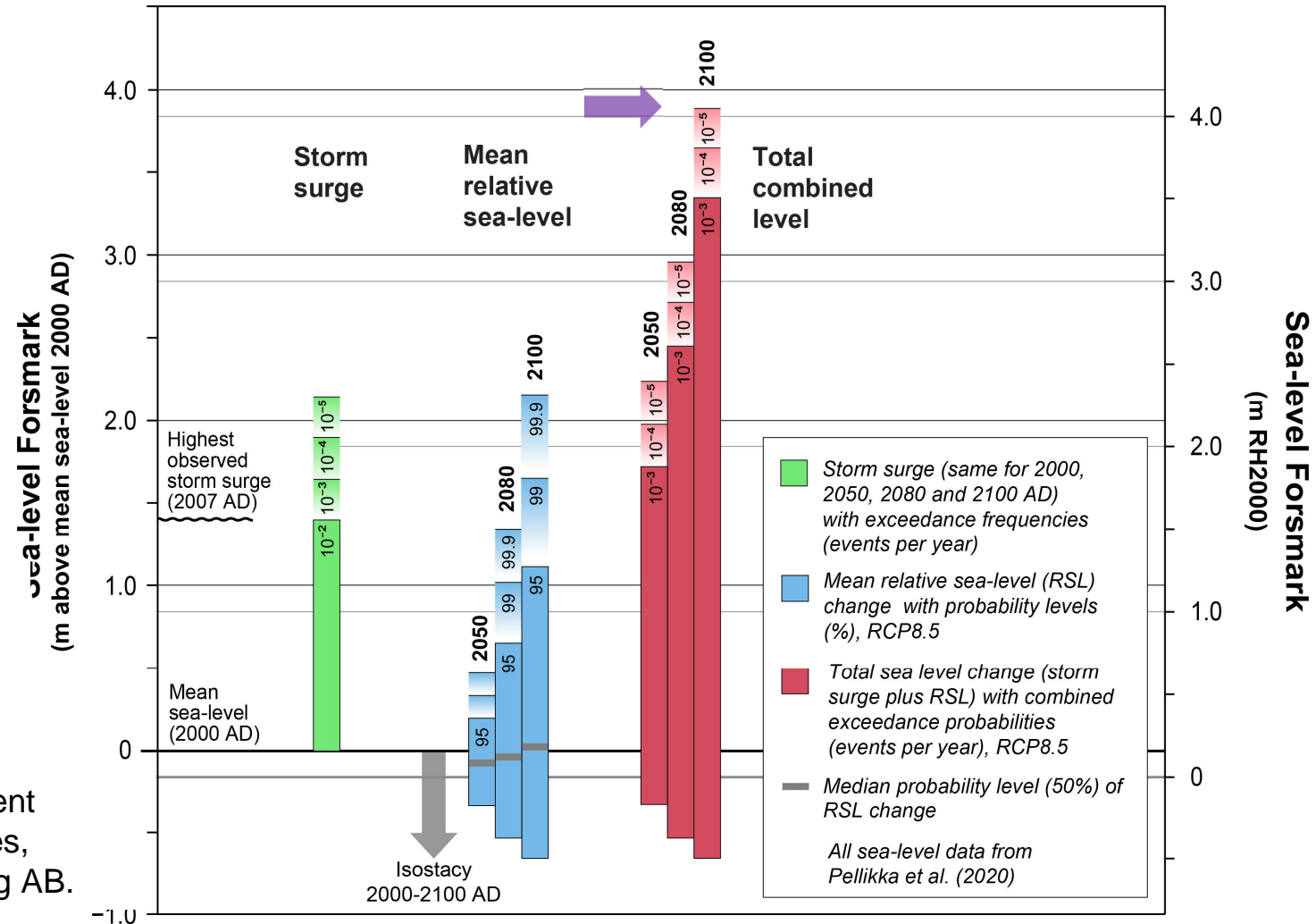
RCP2.6, RCP4.5, **RCP8.5**

Grad av statistisk pessimism

Höjning av medelvattenyta
Återkomsttid stormflod

Från: SKB 2020. Pellikka H, Särkkää J, Johansson M, Pettersson H, 2020. Probability distributions for mean sea level and storm contribution up to 2100 AD at Forsmark. SKB TR-19-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2020. Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark – Climate and climate-related issues, PSAR version. SKB TR-20-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.



Höjning relativ havsnivå 2080, RCP8.5



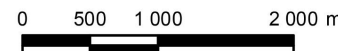
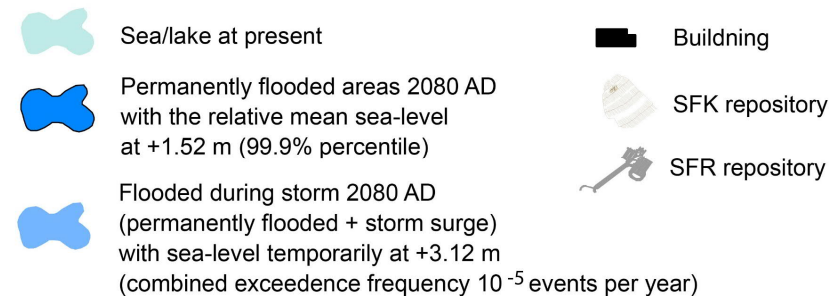
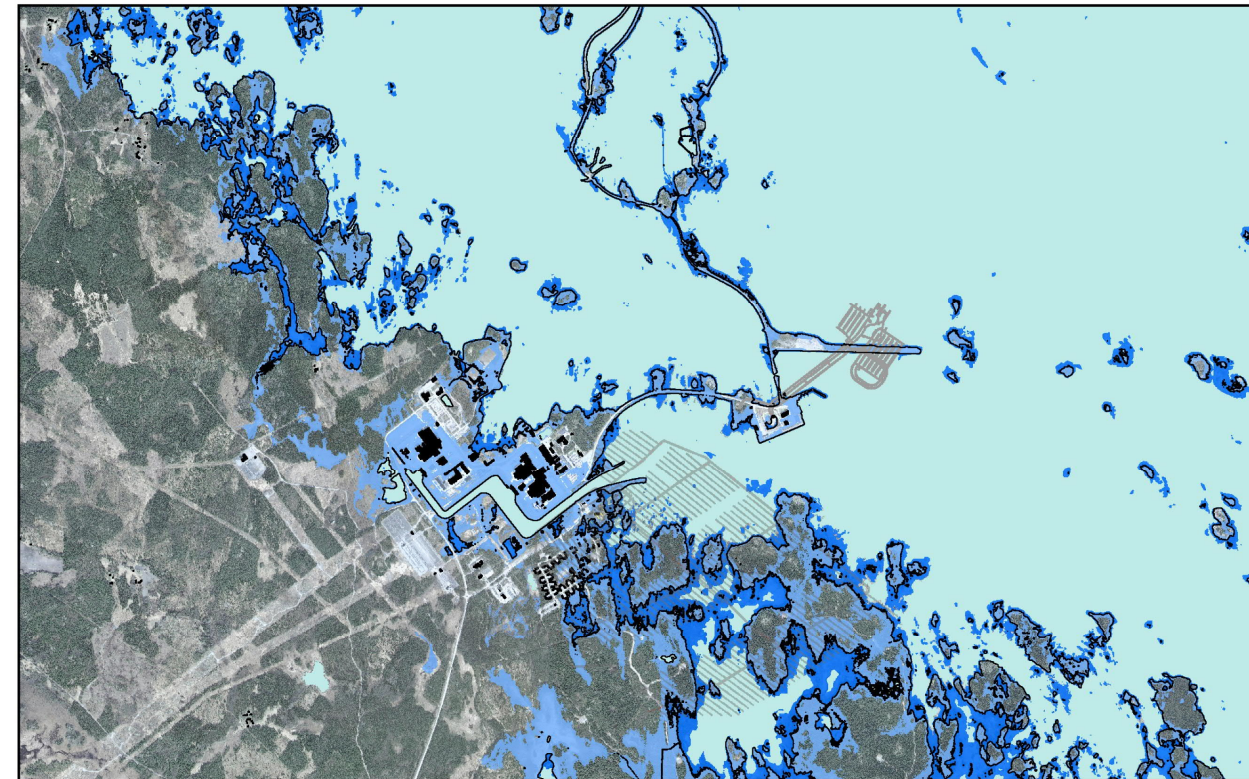
Höjning av medelvattennivå
+1,52 m (RH2000)
(99.9% percentil)

Total höjning vid stormflod
+3,12 m (RH2000)
(10^{-5} 100 000 års nivå, 0.06 % sannolikhet på 60 år)

Högsta observerade nivå vid storm:
+1.42 m (2007)

Vi konstruerar platsen för Kärnbränsleförvaret för att stå emot upp till +4 m (förslutning runt 2080)

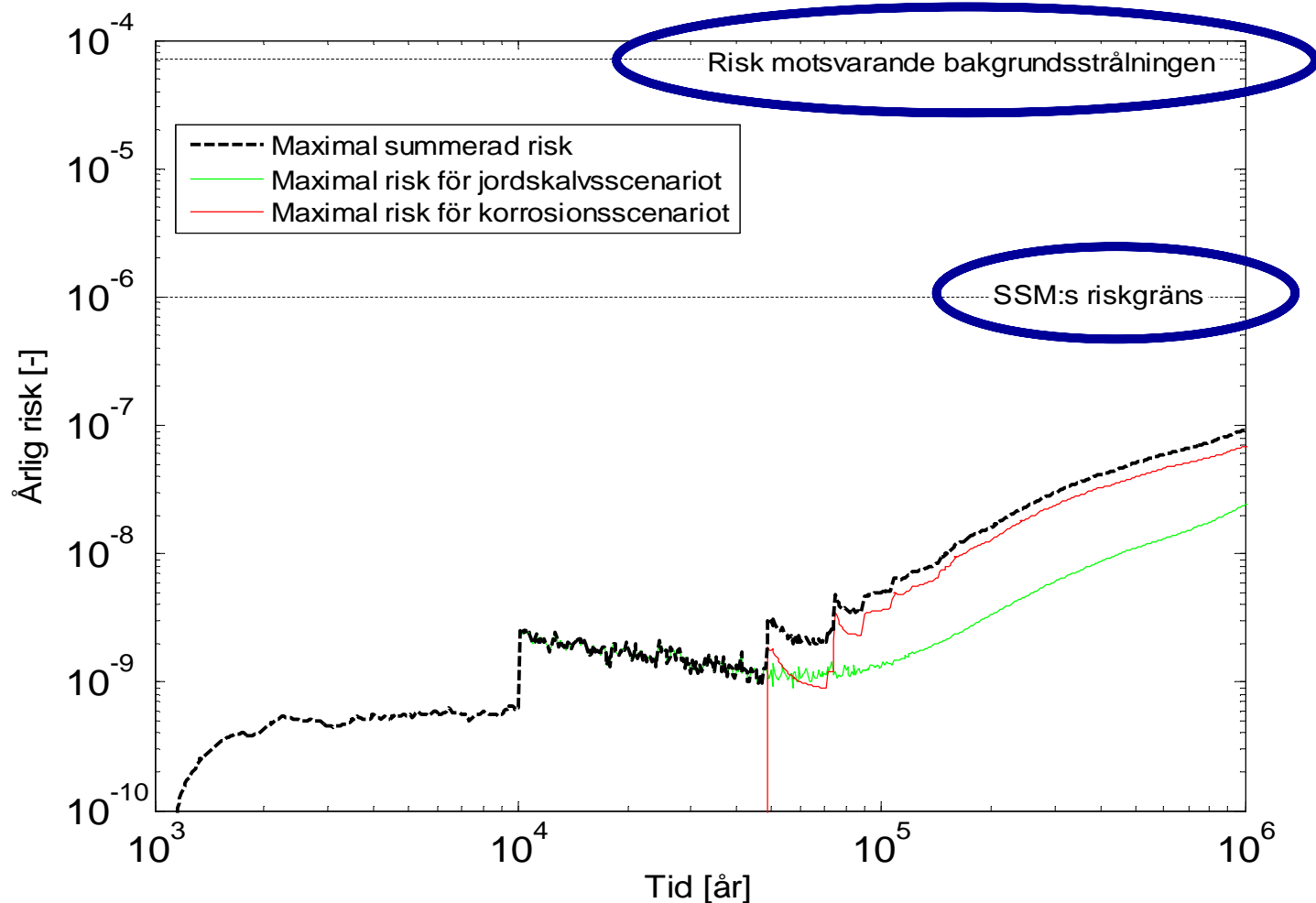
Med möjlighet till ytterligare skydd om framtida monitorering av havsytehöjning skulle motivera det



Bakgrundskartor © Lantmäteriet
Koordinatsystem Sweref 99 1800
SKB/hthf 2020-04-02 13:33

Elevations in the RH2000 height system

Kärnbränsleförvaret: Riskkurvor och SSM:s riskkriterium



- Två pessimistiskt valda scenarier bidrar till att några få kapslar går sönder efter lång tid:
 - Jordskalv
 - Erosion av buffertlera + kopparkorrosion
- Den sammanlagda risken för ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark hamnar ändå med marginal under SSM:s riskkriterium på en miljon års sikt
- Den huvudsakliga slutsatsen är därför att ett långsiktigt säkert KBS-3-förvar kan byggas på Forsmarksplatsen

Rekommendationer



Kan vara stor skillnad mellan SKB:s "extrema" verksamhet och tex stadsplanering. Frågeställningarna kring osäkerhetshantering kan dock vara liknande nu i och med nödvändig klimatanpassning.

- Viktigt att hantera finansieringsfrågan tidigt. I vårt fall var man framsynt och tänkte på det. Och man såg till att även användarna av kärnkraft (elkunderna) är med och betalar.
- Systematiskt identifiera och gå igenom de osäkerheter som finns för det man studerar och se hur de kan hanteras.
- Inte använda första bästa scenario för en viss utveckling (havsnivåprojektion tex) utan tänka igenom vad som krävs. Vilka antaganden ligger bakom de data/modeller man tänker använda? Försöka anpassa nivån (graden av pessimism) till det syfte man har. *"Undersök brett och välj det som är lämpligt utifrån din situation/kravbild"*.
- Göra försiktiga/pessimistiska antaganden om osäkerheten och konsekvensen är stor. Avvägning mot kostnad/tid.
- Flera samverkande skyddsbarriärer av olika typer kan ge bättre (mer robust) skydd än en enda barriär.
- Stegvis process - många tillfällen att inkludera ev. nya frågor.
- Man kan behöva göra om en analys med tiden om kunskapsläget förändras. Tex havsnivå. Möjlighet att vidta ytterligare skyddsåtgärder - inte bygga in sig i en fast struktur där det inte är möjligt.