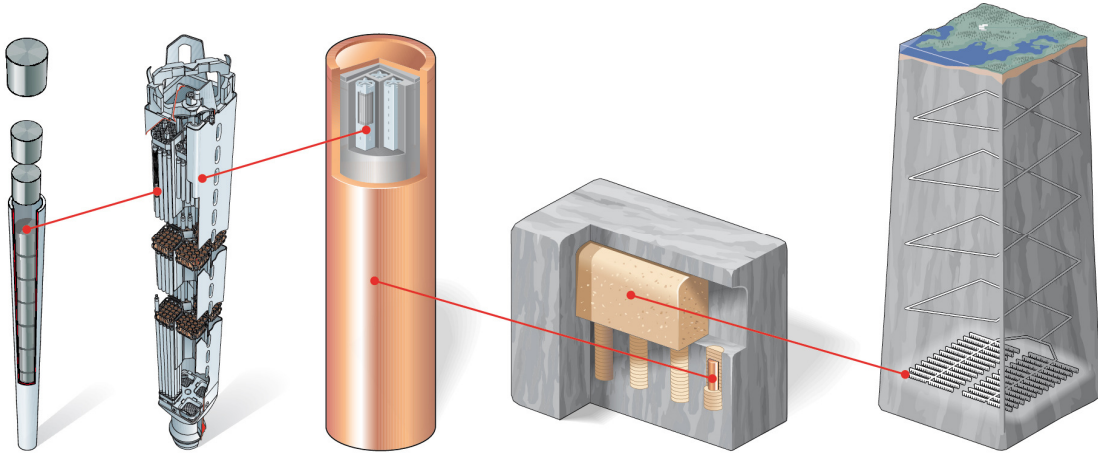


## 18 – Vald metod (KBS-3) och andra studerade metoder

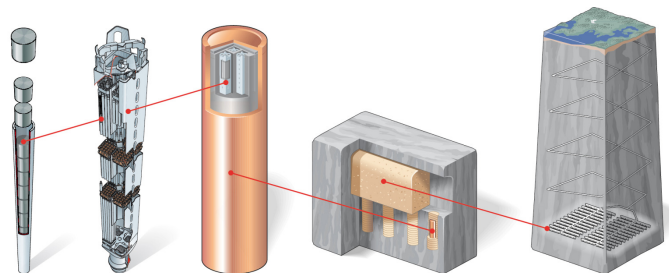


## 18 – Vald metod – KBS-3

Johan Andersson, teknisk fysiker och docent i vattenbyggnad  
 Chef för enheten Analys vid avdelningen för Kärnbränsle

### Översikt

- Säkerhetsprinciper
- Utvecklingsarbete
- Bränslet
- Kapseln
- Buffert, återfyllning och plugg
- Berget
- Krav och kontroller
- Sammanfattning



## Säkerhetsprinciper

Slutförvaret ska placeras djupt ner i en **långsiktigt stabil geologisk miljö** för att isolera avfallet från människor och miljö

- Skyddar från extern strålning
- Minskar risken för påverkan på förvaret av eventuella samhällsförändringar eller av långsiktiga klimatförändringar

Det använda kärnbränslet ska **omges av flera barriärer – tillverkade och naturliga**

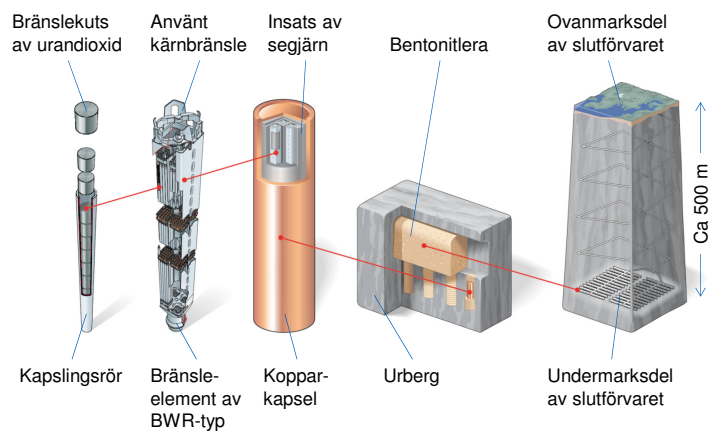
- Primär säkerhetsfunktion ska vara att **innesluta** bränslet i kapseln
- Om inneslutningen skulle brytas ska barriärerna **fördröja** ett eventuellt utsläpp från förvaret
- Barriärer ska bestå av **naturligt förekommande material** som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön
- Ska utformas så att **strålningen** från det använda bränslet **inte leder till skador på barriärerna** eller berget
- Höga temperaturer som på lång sikt kan ha skadlig effekt på barriärernas egenskaper ska undvikas
- Barriärerna **ska fungera utan mänskliga ingrepp** och utan aktiv tillförsel av material eller energi

Slutförvaret ska placeras på en plats där **berget kan antas ha litet ekonomiskt intresse** för framtida generationer

- Minskar risken för intrång

## SKB:s metod – KBS-3

- Det använda kärnbränslet placeras i kopparkapslar med hög tålighet mot korrosion i förvarsmiljön. De cirka fem meter långa kapslarna har en insats av ett gjutjärn (s.k. segjärn) som förstärker stabiliteten.
- Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras på mellan 400–700 meters djup i urberg med långsiktigt stabila förhållanden.
- Kapslarna omges av en buffert av bentonitlera som sväller i vatten, skyddar kapseln vid mindre berg rörelser och skärmar av kapseln från grundvattenrörelser vilket begränsar hur mycket korroderande ämnen i grundvattnet som kan nå kapseln.



## Detaljerna i KBS-3 har utformats i steg

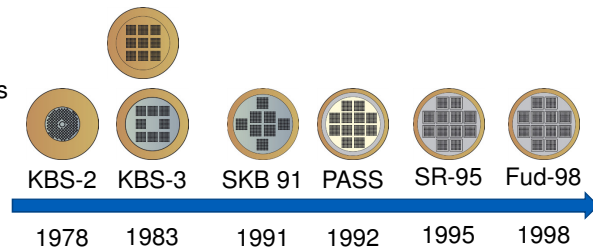
Grunderna för KBS-3-metoden togs fram och presenterades 1983

Hela systemet och dess delar har analyserats och vidareutvecklats upprepade gånger sedan dess

- Hur ska de olika delarna utformas i detalj, tillverkas och installeras?
- Kan säkerheten ytterligare förbättras genom att modifiera utformningen?

För varje vidareutveckling av metoden har sedan säkerheten analyserats

- Detta har i sin tur givit underlag till det fortsatta konstruktionsarbetet



## De viktigaste komponenterna har tagits fram och provats i full skala vid SKB:s laboratorier



## Bränslet – hindrar uttransport

### Använt kärnbränsle

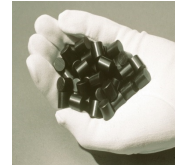
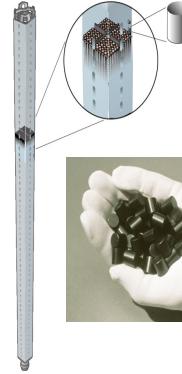
- Keramiskt material som löses upp mycket långsamt
- Många av de farliga radionukliderna har dessutom mycket låg löslighet i vatten

### Det använda kärnbränslet mellanlagras i Clab

- Lagring i vattenbassänger för att hantera värme och strålning
- Radioaktiviteten och värmen avklingar med tiden

### Plan för inkapsling

- Bränsleelement som klingat av cirka 30 år
- Kontrollera innehållet
- Placera i kapslar som sedan försluts



7

## Kapseln innesluter bränslet

5 meter hög och 1 meter i diameter

Yttre hölje (5 cm tjockt) av koppar

- Skyddar mot korrosion
- Tillverkas från kopparämnen med höga krav på kvalitet

Insats av gjutjärn

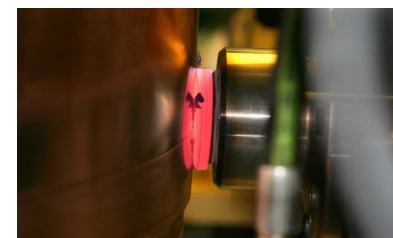
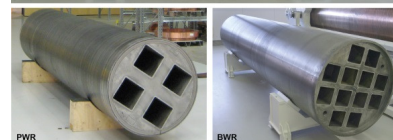
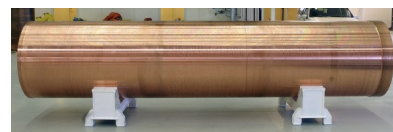
- Skyddar mot mekanisk påverkan
- Gjuts på utvalda gjuterier med höga kvalitetskrav

Sammansättning av kapsel

- Komponenterna kvalitetskontrolleras och sätts samman

Inkapsling

- Bränsleelement väljs ut torkas och placeras i kapseln
- Luften i kapseln byts mot argon
- Kopparlocket svetsas på



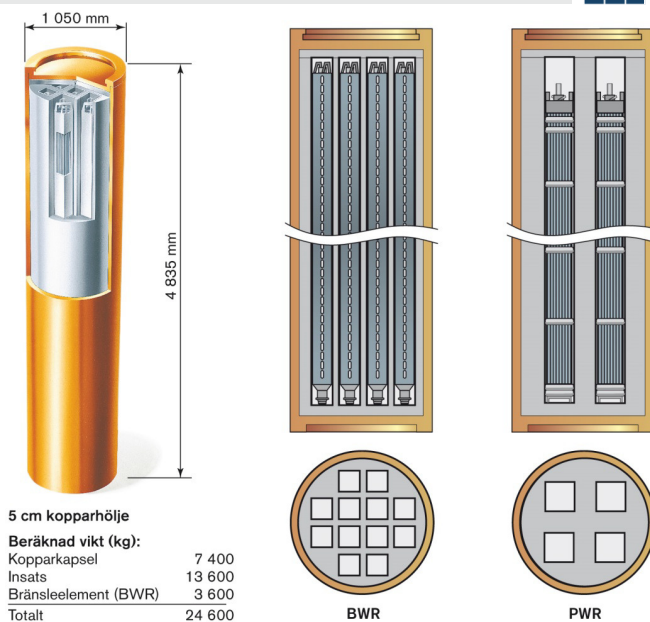
## Kapseln

### Utformning fastslagen

- 4 835 mm hög, 1 050 mm diameter
- 7,4 ton koppar och 13,6 ton järn
- 3,6 ton (BWR) bränsleelement varav 2 ton använt bränsle

### Två typer av insatser (BWR och PWR)

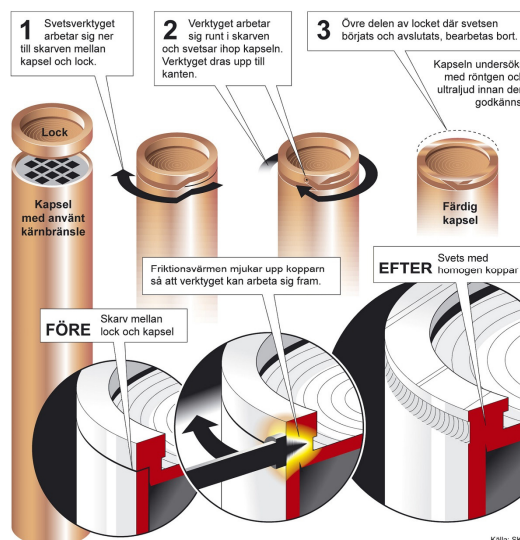
Mer än 70 insatser och mer än 60 kopparhöljen har tillverkats och undersökts



## Svetsning av lock

- Friktions(omrörnings)svetsning valdes för mer än 10 år sedan
- I skarven mellan lock och hölje förs det in ett 5 cm långt verktyg som snurrar 600 varv per minut och därmed värmer upp kopparn, som blir så mjuk att kopparn i locket och höljet blandas
- Resulterar i en i det närmaste homogen sammanfogning
- Robust process som styrs av ett fåtal parametrar som är lätta att kontrollera

### Friktionssvetsning



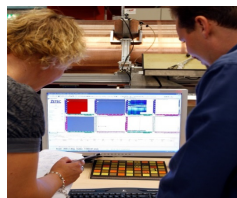


## Krav och kontroller av kapseln

Omfattar bland annat

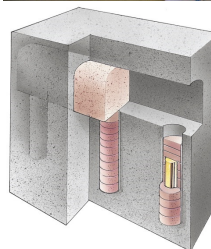
- Kopparkvalitet
- Största tillåtna defekter i kapselinsats
- Svetsning genomförs inom sitt godkända "processfönster"
- Svetsen inte innehåller otillåtna defekter
- Maximal resteffekt i varje kapsel (1 700 W)

Kontroller görs både under tillverkning, vid inkapsling och under deponering



## Buffert och återfyllning av bentonitlera

- Ett naturligt förekommande mineral som sväller i vatten
- Skyddar kapseln vid mindre berg rörelser
- Skärmar av kapseln från grundvatten rörelser, vilket begränsar hur mycket korroderande ämnen i grundvattnet som kan nå kapseln
- Leran absorberar också radioaktiva ämnen som skulle kunna frigöras om kapslarna skadas



## Bufferten – skyddar kapseln

### Bufferten

- Omger kapseln i deponeringshål som borrats i botten av tunnlar i berget

### Tillverkning, installation och kvalitetskontroll

- Kontroll att bentonitmaterialet uppfyller krav
- Buffertblock pressas från bentonitpulver i produktionsanläggning
- Kontroll att blocken uppfyller krav
- Underliggande block och de ringar som kommer att omge kapseln installeras i deponeringshål
- Kapseln installeras
- Resterande buffertblock installeras



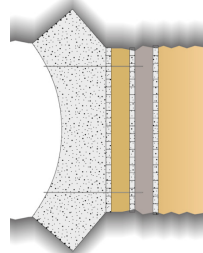
## Återfyllning och plugg – skyddar bufferten

### Återfyllning av deponeringstunnlarna

- Kompakterade bentonitblock omgivna av bentonitpellets
- Hindrar att bufferten sväller upp ur deponeringshålet
- Säkerställer att grundvattnet inte hittar en enklare väg än genom berget

### Plugg i änden av varje deponeringstunnel

- Betong med en särskild bentonittätning
- Säkerställer att återfyllningen är på plats under drifttiden och att inte för mycket vatten rinner ut ur tunnlar under drifttiden
- Ingen funktion efter förslutning när även stamtunneln är återfylld

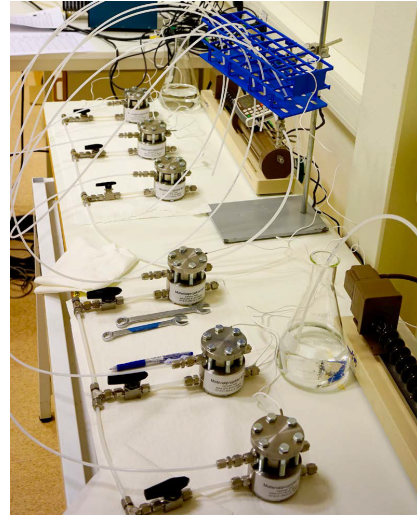


## Krav och kontroller av lerbarriärer

Omfattar bland annat

- Bentonitkvalitet och egenskaper som svälltryck och vattengenomsläpplighet
- Bentonitblockens dimensioner
- Mängd bentonit i varje deponeringshål
- Mängd bentonit i deponeringstunnel

Kontroller görs både under tillverkning och under deponering



## Berget

Svenska urberget stabilt över mycket långa tider

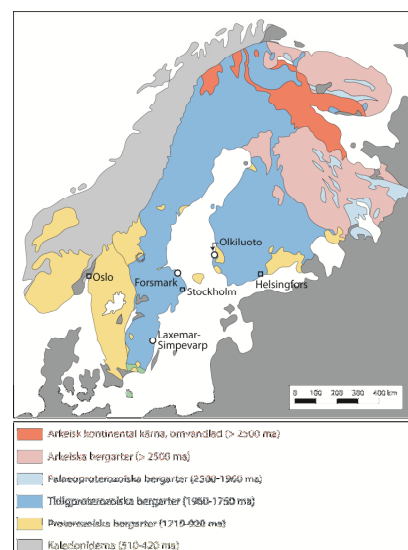
- Bildades för 2 till 1 miljarder år sedan
- Har utsatts för omfattande förändringar på ytan men liten påverkan på större djup
- Långt ifrån aktiva plattgränser
- Berg rörelser längs deformationszoner i olika skalor

Själva bergmaterialet i det närmaste tätt

- Grundvatten strömmar i vattenförande sprickor
- Frekvensen av vattenförande sprickor avtar i regel med djupet

Under de översta nivåerna är grundvattnet fritt från löst syre

- Det syre som finns löst i regnvattnet förbrukas snabbt i överliggande jord och det ytliga berget





## Berget skyddar kapsel och buffert – hindrar uttransport

### Berget skyddar genom

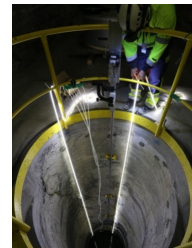
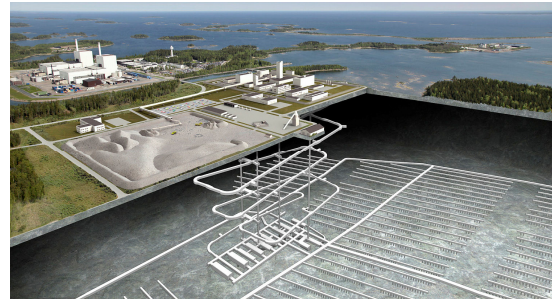
- Kemisk miljö som skyddar kapseln
- Få vattenförande sprickor med låg grundvattenströmning
- Långsam uttransport om kapseln skadas
- Mekanisk stabil miljö

### Förvaret byggs på en nivå mellan 400 m och 700 m djup

- Tillräckligt djupt för att förvaret inte ska påverkas av det som händer på ytan
- Lokal anpassning till de nivåer där berget har lämpliga egenskaper
- Inte onödigt djupt så att det blir praktiskt ogenomförbart

### Olika tunnlar och bergrum

- Tillfarter, centralområde, stam- och transporttunnlar
- Deponeringstunnlar med deponeringshål borrade i botten på deponeringstunnlarna



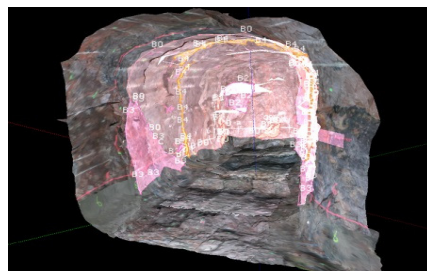
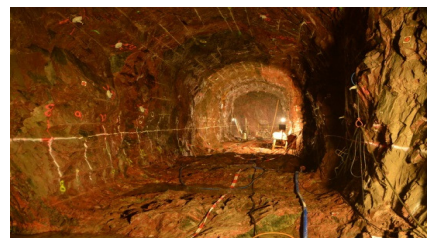
## Krav och kontroller av berget

### Omfattar bland annat

- Placering av förvaret i berget med respektavstånd till bergets större deformationszoner
- Placering av deponeringshål för att undvika att dessa korsas av stora sprickor eller sprickor med höga vattenflöden
- Tillräckligt avstånd mellan kapslar för att säkerställa att bentoniten inte blir varmare än 100 grader
- Geometri och utförande av bergarbeten

### Förvaret byggs ut och undersöks under hela drifttiden

- Olika mätningar i borrhål "pilothål" innan beslut tas om att ta ut en deponeringstunnel
- Kartering och mätningar i den färdiga tunneln för att säkerställa att tunneln uppfyller förväntningar och krav och för att hitta och undersöka lämpliga lägen för deponeringshål
- Undersökningar av varje tänkbart deponeringshål
- Kontroll av att den grundläggande kunskapen inte ändrats



## Sammanfattning

- Det använda kärnbränslet placeras i kopparkapslar med hög tålighet mot korrosion i förvarsmiljön och med en insats av gjutjärn som förstärker stabiliteten
- Kapslarna omges av en buffert av bentonitlera som sväller i vatten, skyddar kapseln vid mindre berg rörelser och skärmar av kapseln från grundvattenrörelser vilket begränsar hur mycket korroderande ämnen i grundvattnet som kan nå kapseln
- Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras i urberg med långsiktigt stabila förhållanden
- Kontroll av att barriärerna uppfyller ställda krav görs både under tillverkning, vid inkapsling och under deponering
- De viktigaste komponenterna har tagits fram och provats i full skala

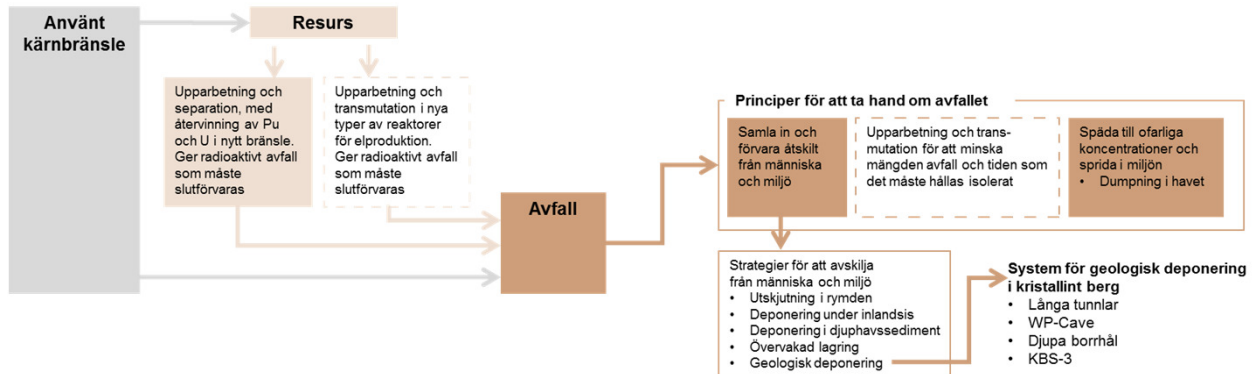
## Andra studerade metoder

### Översikt

- Är använt bränsle resurs eller avfall?
- Resurs
  - Återanvändning i dagens reaktorer
  - Användning i snabbreaktorer
- Avfall
  - Principer för att ta hand om avfall
  - Olika metoder för geologisk deponering inklusive slutförvaring i djupa borrhål
- Sammanfattning



## En systematisk genomgång



## Resurs?

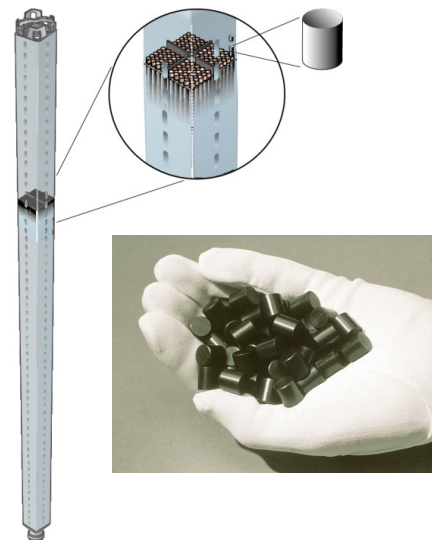
Det använda bränslet i Clab består till runt 1 % av plutonium

- 1 % motsvarar 60 ton idag och ca 120 ton på sikt
- Dessutom finns det kvar ungefär lika mycket uran-235

Plutonium och uran-235 är bränsle för reaktorer

- Men måste skiljas från det använda bränslet (upparbetas och återvinnas)
- Återanvändning i dagens reaktorer
- Startbränsle för snabbreaktorer

Kräver nya system och anläggningar



## Resurs – återanvändning i dagens reaktorer

Tillämpas i stor skala i bl a Frankrike, Ryssland, Storbritannien och Japan

### System

- Upparbetning och återvinning av uran och plutonium
- Högaktivt förglasat avfall (klyvningsprodukter och andra ämnen) och radioaktivt driftavfall
- Produktion av blandoxidbränsle (MOX)
- MOX-bränslet kan sedan användas som bränsle i vanliga reaktorer



### Nytta?

- Klyvbart material i det använda bränslet återanvänds – något minskat behov av uranbrytning
- Inte praktiskt att upparbeta använt MOX-bränsle
- Inte ekonomiskt försvarbart

**Slutförvar för förglasat avfall och för använt MOX-bränsle behövs**

## Resurs – användning i snabbreaktorer

### Återanvändning i snabbreaktorer (bridreaktorer)

- Plutonium som återvinns kan, i princip, återanvändas i sk snabbreaktorer
- Runt 10 ton plutonium behövs för att starta en stor snabbreaktor
- Reaktorn producerar sedan sitt eget plutonium från tillfört uran-238

### Upparbetning och separation behövs

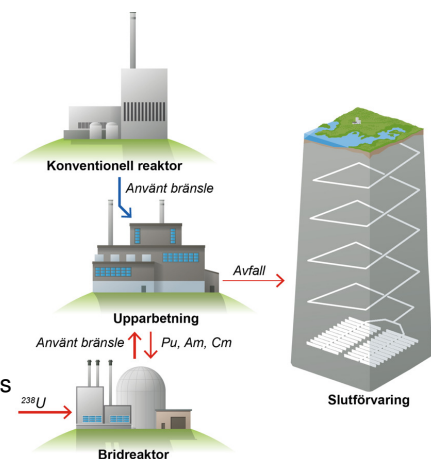
- Upparbetning och återvinning av uran och plutonium, men även andra radioaktiva ämnen med långa halveringstider separeras fram
- Processen producerar radioaktivt driftavfall som förglasas

### Är det plutonium som finns i Clab en resurs för detta?

- Plutonium i mycket renare form finns i världen i fullt tillräcklig mängd för uppstart av eventuella snabbreaktorer

Helt nya, stora och komplexa typer av reaktorer och anläggningar behövs och uppberedningsmetoderna behöver utvecklas

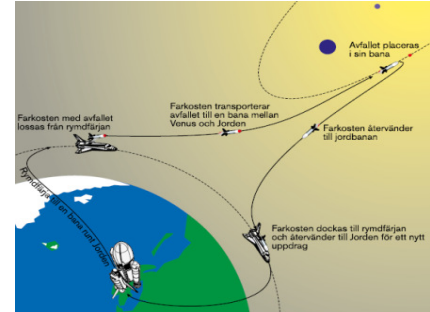
- Ekonomiska drivkrafter för att etablera systemet saknas



**Slutförvar behövs ändå för omställning från nuvarande kärnkraftssystem samt för omhändertagande av radioaktivt driftavfall och sluthärdar**

## Avfall

- Kvittblivning genom utskjutning i rymden
  - För stora risker
- Deponering i otillgängliga områden, till exempel under Antarktis istäcke eller i havsbottensediment på stort djup
  - Bryter mot internationella konventioner
- Långtidslagring av det använda bränslet i ett övervakat förvar – eventuellt i avvaktan på den fortsatta utvecklingen av andra strategiska och tekniska alternativ
  - Samma som nollalternativet
  - En förlängd övervakad lagring är inget slutligt omhändertagande och uppfyller alltså inte de krav som lagstiftningen ställer på kärnkraftsproducenterna
- Geologisk deponering – slutlig förvaring av avfallet i berggrunden
  - Det SKB föreslår



## Geologisk deponering – internationellt erkänd metod

**Det finns en bred enighet internationellt om att geologisk deponering är den metod som lämpar sig bäst för använt kärnbränsle och annat långlivat och högaktivt avfall.**

2011/70/EURATOM "Kärnavfallsdirektivet" "... Det är allmänt accepterat på teknisk nivå att djup geologisk slutförvaring för närvarande utgör det säkraste och mest hållbara alternativet som slutpunkt för hanteringen av högaktivt avfall och använt kärnbränsle som betraktas som avfall..."

Flera länder planerar för geologisk slutförvaring av använt kärnbränsle och högaktivt avfall.

- De tekniska lösningarna liknar varandra, men varierar något beroende på vilken typ av geologisk formation som finns att tillgå: Urberg (så kallat kristallint berg), ler- eller saltformationer.



## Metoder för slutlig deponering i berggrund

### Den valda KBS-3-metoden

**Långa tunnlar under Östersjön** – inkapslat bränsle placeras i ett fåtal parallella, ca 5 km långa, tunnlar på 400–700 m djup

- Komplicerat uppförande och drift

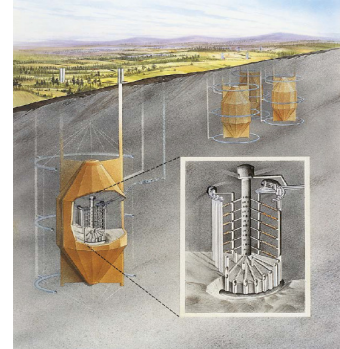
**WP-Cave** – inkapslat bränsle placeras tätt i en begränsad bergvolym på 300–500 m djup helt omgiven av en buffert i sin tur omgiven av ett system av öppna tunnlar

- Oklart om konceptet fungerar
- Tekniskt komplicerat

**Dry Rock Deposit (DRD)** – förvaret omges av öppna och dränerade tunnlar/borrhål

- Oklart om konceptet fungerar på lång sikt

**Djupa borrhål** – inkapslat bränsle placeras i ca 5 km djupa borrhål

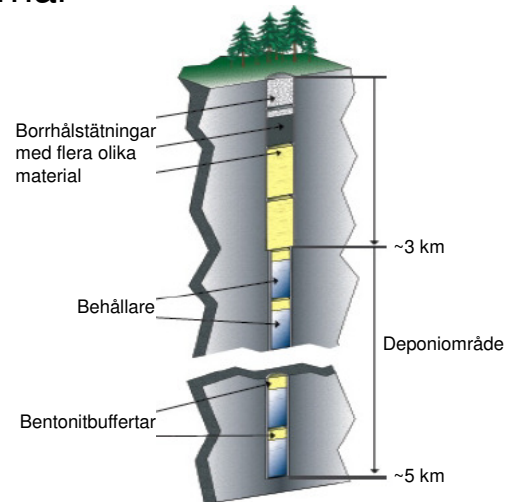


## Deponering i djupa borrhål – historik

- Deponering i djupa borrhål har diskuterats sedan 1950-talet.
- Togs upp i SKB:s PASS-studie (1992) och rankades sist av analyserade koncept med hänsyn till teknik, ekonomi och säkerhet.
- 1998–2004 genomförde SKB flera studier av geovetenskapliga data, FoU-behov och borrhåsteknik.
- Konceptstudier i USA under senare år. Projektet lades ner våren 2017.
- SKB har följt den internationella utvecklingen och publicerat flera utvärderingar av konceptets förutsättningar att uppfylla rimliga krav.

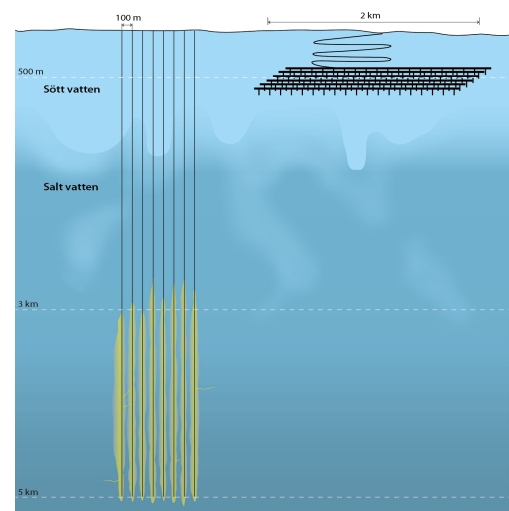
## Exempel på slutförvaring i djupa borrhål

- Stålkapslar med använt bränsle kopplas ihop till 200 m långa strängar med 40 kapslar som staplas i de nedre 2 km av 5 km djupa borrhål
- Betongproppar installeras mellan strängarna för att begränsa vikten på underliggande kapslar
- De övre 3 km tätas med en kombination av olika material (betong, bentonit ...)
- Den svenska kärnkraften ger upphov till använt bränsle som skulle kräva ca 80 sådana borrhål över en markyta om minst 1 km<sup>2</sup>



## Djupa borrhål – säkerhetsfunktioner

- **Primär säkerhetsfunktion** – salt grundvatten på stora djup med högre densitet förväntas röra sig mycket långsamt
- **Sekundär säkerhetsfunktion** – fördröjning i berget av radionuklider som frigörs från kapslarna
- Närzonen (kapslar och buffert i borrhålet) tillskrivs ingen långsiktig skyddsverkan



## Upprätthålls säkerhetsfunktionerna?

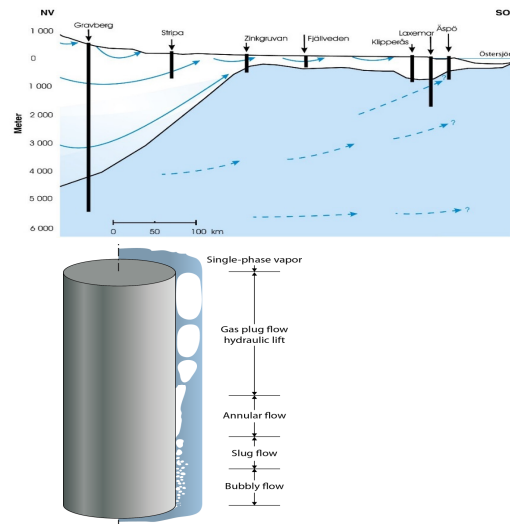
Djupet till salt vatten varierar beroende på var man är i landet

- Platsundersökningar skulle krävas innan lämplig plats skulle kunna väljas

Kapslarna korroderar i det varma och salta grundvattnet

- Godsförtunning leder till att kapslar på sikt ger vika för tyngden av ovanpåliggande kapslar
- Ger snabbt läckage till grundvattnet i och intill deponeringshålen
- Vätgasutveckling ger drivande kraft för uppåtriktad strömning längs hålet

Borrhålet deformeras pga bergspänningar – svårt att installera och verifiera effektiv tätning



## Djupa borrhål – slutsatser

Tänkbara fördelar

- Deponeringen sker på stort djup i tänkbart stagnant saltvatten
- Innebär långa transporttider, såvida inte snabba transportvägar skapats via deponeringshålet eller via zoner i berget
- Minskar risken för oavsiktligt intrång tack vare det större djupet

Har stora principiella säkerhetsmässiga svagheter jämfört med KBS-3-metoden

- Risker vid installation. Kapslar skulle kunna fastna på fel djup och/eller skadas i samband med deponeringen. Radiologiska risker för personal, allmänhet och miljö
- Djupet till stagnant salt vatten varierar både nationellt och lokalt
- Miljön på flera kilometers djup är mer aggressiv (hög salthalt, hög temperatur, högt tryck). Kapseln korroderar och kollapsar snabbt. Utmanande att täta borrhålet
- Konceptet bedöms inte uppfylla de säkerhetskrav på kontrollerbarhet, reparerbarhet och strålsäkerhet som ställs på kärnteknisk verksamhet

SKB menar att det inte är rimligt att satsa på ytterligare omfattande utvecklingsarbete

## Sammanfattning

- Avfall uppkommer och behöver slutförvaras i alla strategier
- Det använda bränslet är i praktiken inte en resurs, åtminstone inte i Sverige utan måste hanteras som avfall
- En förlängd övervakad lagring är inget slutligt omhändertagande
- Det finns en bred enighet internationellt om att geologisk deponering är den metod som lämpar sig bäst för använt kärnbränsle och annat långlivat och högaktivt avfall
- Djupa borrhål har stora principiella säkerhetsmässiga svagheter jämfört med KBS-3 som inte uppvägs av tänkbara fördelar. Vidare utveckling är inte motiverad
- Ansökan visar att KBS-3 ger säkerhet under drift och efter förslutning
- KBS-3-systemets viktigaste beståndsdelar finns framtagna och testade i full skala