



# Lerbuffertens stabilitet och saunaeffekten

## Replik – lerbuffertens stabilitet och saunaeffekten

Patrik Sellin, civilingenjör Kemiteknik, koordinator på SKB för forskning kring buffertens långsiktiga funktion

### Översikt

- Varför bentonitlera?
- Förloppet i ett deponeringshål
- Invändningar

## Bentonitbufferten introducerades i KBS-2 (1978)

- ”Genom att använda ren bentonit med hög densitet erhåller man ett buffertmaterial som har mycket låg permeabilitet och diffusivitet och som i övrigt har de egenskaper som ett buffertmaterial bör ha nämligen:
  - God bärighet, så att kapseln behåller sitt läge i deponeringshålet
  - God värmeledningsförmåga, så att det värme som bränslet i kapseln avger överförs till berget utan att kapseln får för hög temperatur
  - Hög jonbytesförmåga, så att vandrigen av radioaktiva ämnen som kan läcka ut från kapseln fördröjs
  - Långtidsstabilitet, så att materialet bibehåller sina egenskaper under den mycket långa tid som slutförvarets funktion skall vidmakthållas
- Ett villkor är också att buffertmaterialet inte skall innehålla komponenter som på ett avgörande sätt kan minska kopparkapselns korrosionsbeständighet
- Förutom ovannämnda egenskaper karaktäriseras bentonit med hög densitet att den vid förhindrad svällning ger upphov till ett mycket högt svällningstryck när bentoniten tar upp vatten. Härigenom erhålles en garanti för att för att vattenförande sprickor inte kan uppkomma i buffertmaterialet”

### Kärnbränslecykelns slutsteg

#### Slutförvaring av använt kärnbränsle

- I Allmän del
- II Teknisk del

KÄRN -  
BRÄNSLE -  
SÄKERHET

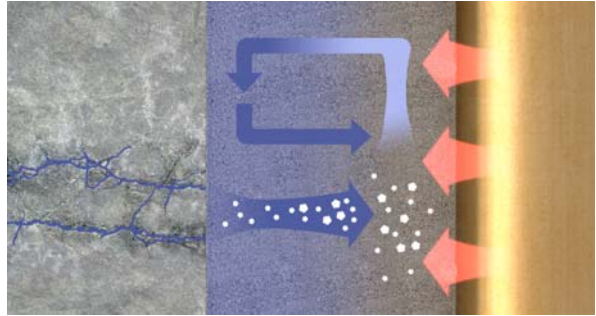
## Forsknings- och teknikutvecklingsinsatser sedan 1978

- Omfattande laboratoriestudier
  - Fundamentala egenskaper
  - Enskilda processer
- Utveckling av datorprogram
  - Buffertens hydromekaniska utveckling
- Fältförsök
  - Buffertens integrerade funktion
  - Fokus på enskilda processer
- Teknikutveckling
  - Tillverkning av buffertblock och pellets
  - Installation av buffert
  - Optimering av konceptet



## Förloppet i ett deponeringshål

- Temperaturfördelningen gör att vatten omfördelas från den varmare delen av bufferten till den kallare
- Vatten kommer in från berget
  - Antingen från en spricka (snabbare)
  - Eller bergmatrisen (mycket långsamt)
- När den yttre delen av bufferten sväller sjunker inflödet
  - Detta gör att vattenmättnaden tar ~10 år även med ett högt inflöde till deponeringshålet
- Vatten kommer att förångas och kondensera tills bufferten är helt mättad
- Vatten kommer dock inte att lämna deponeringshålet



## Förloppet i ett deponeringshål – långsiktig funktion

- När buffeten har vattenmättats utvecklas ett svälltryck mot kapsel och berg
  - Hålrum fylls och bufferten homogeniseras
- Buffertens vattengenomsläpplighet (hydrauliska konduktivitet) blir mycket låg
  - Vatten kan inte strömma i bufferten
  - All transport sker med diffusion
- Vattenmättnaden kan ta 10 - 5 000 år
  - Sluttillståndet blir dock detsamma
- Bentoniten torkas efter den kommer ifrån gruvan – torkning förändrar inte dess egenskaper

## Invändningar

- Långsiktig stabilitet?
- Ångtransport med saltanrikning (saunaeffekten)
- Permanent sprickbildning
- Snabb vattentransport till kapseln med åtföljande korrosion

## *”Beständigheten hos lerbufferten i HLW-förvar”*

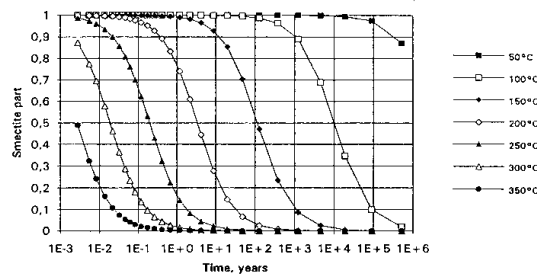
SKB delar den uppfattning från som Naturskyddsföreningen och MKG:s expert, professor Pusch anfört

- Bildning av illit och kiselutfällning kommer att ha en negativ påverkan på buffertens funktion
- Olika bentoniter kan ha olika stabilitet mot omvandling
  - De flesta kan dock ses som stabila under förvarsförhållanden (nästa bild)
  - SKB delar professor Puschs uppfattning att val av material och densitet är en optimeringsfråga
- Den peristaltiska ångtransport som professor Pusch beskriver kan ske om vatten kokar i deponeringshålet
  - Temperaturkravet på 100 °C gör att kokning undviks

## ”Hur snabbt bryts de viktigaste mineralen ned?” (från professor Puschs presentation)

### ”Drivkrafter:

- *Temperaturen*
- *Vattnets sammansättning (kaliumhalt, kiselhalt, aluminiumhalt)*
- *Tiden*
- *Den ”termodynamiska benägenheten”, dvs Aktiveringsenergin”*



## Kommentarer till professor Puschs presentation (1/2)

- Processerna som Pusch diskuterar finns behandlade i SR-Site
- Valet av bentonitmaterial är en optimeringsfråga där den termiska stabiliteten är en faktor
  - Saponit kunde vara intressant, men tillgången är begränsad
  - MX-80 övergavs som referensmaterial i samband med Fud-program 2001
- Ånga under tryck kan bara ansamlas om vattnet i bufferten kokar
  - Kondensation kan balansera förångning
  - Temperaturkriteriet förhindrar kokning
- Effekten av ånga för bentonits svällegenskaper diskuteras ingående i Leupin et al 2014 (Nagra Technical Report 14-12):
  - Slutsatsen är att det inte finns något som tyder på att ånga påverkar svällegenskaperna
  - Stöds av en mängd studier, bl a Pusch 2003
  - De ofta refererade resultaten från Couture kan förklaras med att han mätte sedimentation, inte svällning

## Kommentarer till professor Puschs presentation (2/2)

- Elektronmikroskopbilderna visar en bentonit som först utsatts för en koncentrerad saltlösning och sedan torkats för att kunna köras i mikroskopet
  - Det är helt förväntat att salt faller ut vid torkning
- SKB:s studier visar också att vattenmättad bentonit blir styvare vid uppvärmning
  - Hänsyn till detta tas i analysen av skjuvning i SR-Site
- Kinnekullebentoniten upphettats till 160 °C under några hundra år
  - Detta är avsevärt varmare än bufferten i ett KBS-3-förvar i Forsmark
  - Omvandlingen överensstämmer med den bild som professor Pusch (och jag) visade
  - Dessutom har Kinnekulleleran lagrats i 400 miljoner år efter denna termiska fas

## Slutsats

Den bild som SKB ger av lerbufferten i SR-Site kvarstår – den bedöms förbli stabil även i ett miljonårsperspektiv

- Detta gäller för den temperaturutveckling som kan förväntas i ett KBS-3-förvar i Forsmark

## Invändningar

- Grunder: "Sauna-effekten försämrar barriäregenskaperna för två av tre passiva barriärerna – kopparkapseln och bentoniten. Detta sker i de deponeringshål där samtidigt vattenflöderna är extra höga!"
- Naturskyddsföreningen/MKG: "Det torra berget i Forsmark är dåligt för funktionen av de konstgjorda barriärerna (kopparkapsel och lerbuffert) och för möjligheten att få deponeringstunnlarna långsiktigt täta. Det torra berget i Forsmark är inte alls bra för att de konstgjorda barriärerna (kopparkapslar och bentonitlerbuffert) ska fungera som tänkt."

## Problemställning

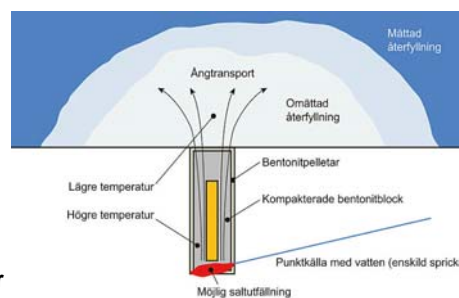
### Sauna-effekten

- Vatten transporteras in genom en spricka i deponeringshålets vägg
- Ånga transporteras ut genom bufferten ut till tunneln
- Anrikning av salt från grundvattnet i deponeringshålet

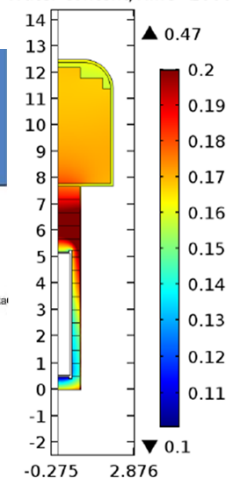
### SKB:s syn

- **I ett deponeringshål enligt KBS-3 kommer detta inte att ske**
- Bildad ånga kondenserar i deponeringshålen
- Försumbar ångtransport till tunneln

Detta kommer att beskrivas mer i följande bilder



Water content, Time=20000

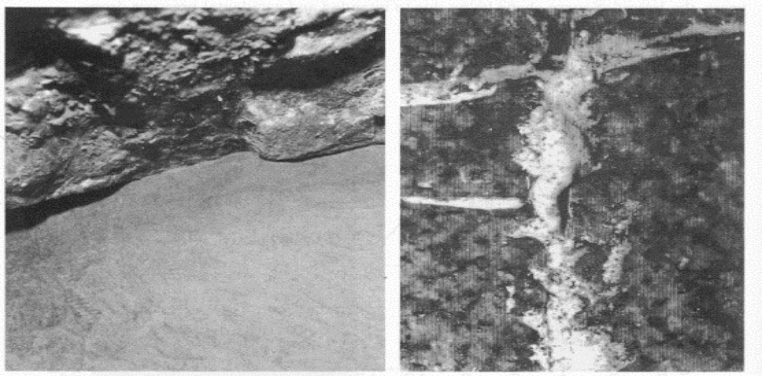


## Sprickor i bentonitblock

- Bentonitblock/ringar spricker om vatten tas upp eller omfördelas snabbt
  - Omfördelning av vatten sker vid uppvärmning, direkt efter installation
- Detta kan förväntas ske i de flesta deponeringshål
- När mer vatten tas upp kommer sprickorna att läka
- Sprickor har troligtvis bildats i de flesta fullskaleförsök i Äspö
  - Baserat på observationer från laboratorieförsök
  - Bilden visar sprickor i ett laboratorieförsök
- **Inga spår av dessa sprickor har dock funnits då fältförsöken har brutits**
  - Detta visar på en effektiv självläkning vid vattenupptag, vilket också sågs som en grundläggande funktion redan i KBS-2



*Smektitlera har utmärkt självläkningsförmåga om den inte utsatts för cementering som innebär förlust av denna förmåga.*



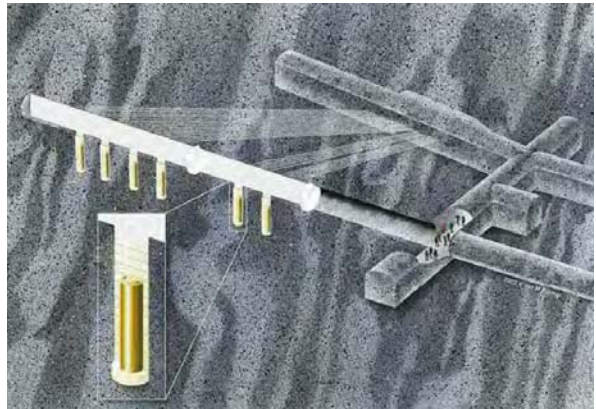
Från professor Puschs presentation

*Vänstra bilden: Tätt kontakt mellan block av högkompakterad lera av tegelstensstorlek som tagit upp vatten från väggen i en sprängd tunnel och svällt. Högra bilden: lera som vandrat in i en millimetervid bergspricka och börjat svälla ut efter borttagning av tunnelåterfyllningen. **Cementerad lera sväller inte!***



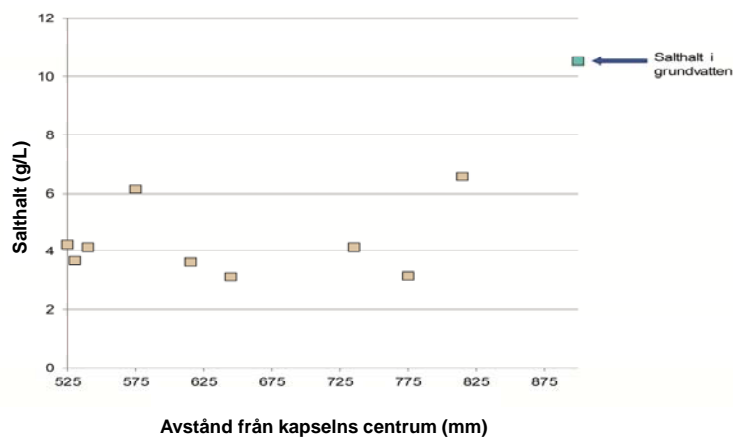
## Fullskaleförsök – slutsatser angående saunaeffekten

- Prototypförvaret i Äspö
- 1 700–1 800 W effekt
- Yttre sektionen drevs 7 år
- Bröts 2011
- Relativt högt flöde till deponeringshål
- Vattenmättnad ~95 % (bekräftar vattenmättnad på ~10 år)



## Klorid i Prototypförvaret

Data från TR 13-22



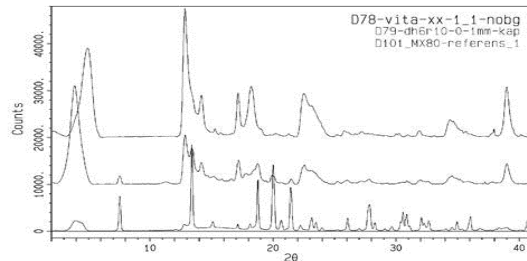
- Inga förhöjda kloridkoncentrationer i närheten av kapseln/värmaren
- Inga tecken på "saunaeffekt"
- Lägre salthalt i vattnet i bufferten än i det omgivande grundvattnet

## Observerade "saltutfällningar"

Utfällningar närmast kapseln/värmaren

TR 13-22

Identifierat som gips, inte halit (NaCl)



Stämmer med avsnitt 10.3.12 i SR-Site

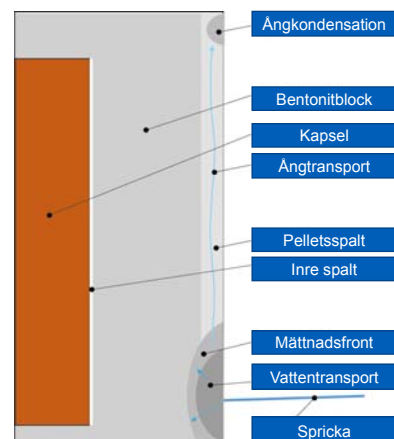
Gips faller ut vid förhöjd temperatur  
– även utan förångning av vatten

## Deponeringshål med "långt" inflöde

För de positioner som vattenmättas långsamt är risken för saltanrikning obefintlig

- Vattenmättningen styrs av tillgång till vatten i berget
- Bufferten kommer att mättas jämnt från utsidan och inåt, eftersom vatten kommer från hela bergytan
- Den mängd vatten och salt som per tidsenhet kommer till deponeringshålet blir mycket liten (~0,5 liter på år)
- Efter 1 000 år är den maximala temperaturen i bufferten mindre än 40 °C

Ett långt inflöde är generellt positivt för långsiktig funktion hos kapsel och buffert



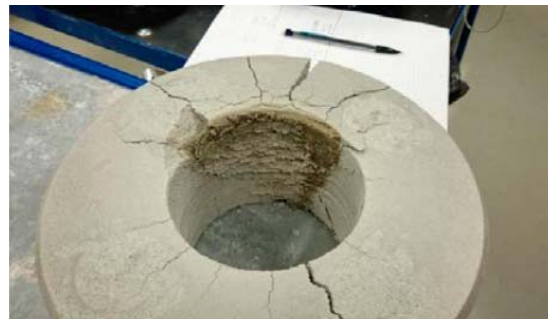
## Övrigt

Grinder: *"SKB har avrapporterat tre experimentella undersökningar av Sauna-effekten, se SKB R-13-21, SKB TR-15-09 och SKB TR-17-07. Dessa bekräftar förekomsten av Sauna-effekten, dvs det sker en förångning av vatten i deponeringshålen (primärt på kopparkapslarnas yttertor) samt en kondensation av vattenångan i deponeringstunnlarna. Detta ger en anrikning av salter i deponeringshålen."*

- Avsikten med försöken i de refererade rapporterna var att studera de enskilda processer som påverkar upptag av ånga och kondensation i bentonit. De representerar inte förhållanden i ett deponeringshål.
- Med definitionen av sauna-effekt enligt TR-17-07 (bild 15), så har *inte* någon av studierna bekräftat förekomsten av saunaeffekt.

## Kommentarer till Olle Grinders presentation 1(2)

- Grinder: *"SKB har avrapporterat tre experimentella undersökningar av Sauna-effekten, se SKB R-13-21, SKB TR-15-09 och SKB TR-17-07. Dessa bekräftar förekomsten av Sauna-effekten, dvs det sker en förångning av vatten i deponeringshålen (primärt på kopparkapslarnas yttertor) samt en kondensation av vattenångan i deponeringstunnlarna. Detta ger en anrikning av salter i deponeringshålen."*
- Grinder hävdar att kondensationen sker i deponeringstunnlarna långt bort från kapsel samtidigt som han visar en bild där kondensationen sker i direkt anslutning till värmaren/kapseln.



## Kommentarer till Olle Grinders presentation 2(2)

Grinder: "Kondensation och absorption resulterade vid alla försöken till omfattande sprickbildning av bentonitblocken. Inga resultat har presenterats som visar att ångflöde förhindras."

- Ett huvudresultat vad det gäller ångtransport i den inre spalten är att ångan stannar i den inre spalten – den fungerar som ett isolerat system. De ångförluster som noteras i dessa försök kommer från de yttre delarna av blocken.

Grinder: "Korrosion har erhållits på grund av saltavlagring på kopparytan."

- Bilden som Grinder hänvisar till visar kopparvärmaren innan försöket. Syftet med försöket var inte att studera korrosion.



Figure 2-1. Left: copper heater and steel bottom plate. The plastic filter (white) is visible at the bottom of the groove. The outer diameter of this groove is 18.2 cm, and the inner diameter is 10.8 cm. Right: bentonite ring emplaced.

## Sammanfattning

- Observationer från fältförsök och från Birgersson och Goudarzi 2017 har visat att även om ånga kan transporteras relativt fritt i bentonitpellets och spalter mellan kapsel och block så bildas kondensationspunkter, mest troligt i blocket ovanpå kapseln
  - Dessa kondensationspunkter är mycket effektiva för att kondensera vattenånga
  - Det finns inget i de rapporter som SKB publicerat som tyder på att vatten från kondensationspunkter kan transporteras upp genom buffertblocken till deponeringstunneln
- Det är osannolikt att en större mängd vatten kan förångas vid kapseln innan en större del av bufferten är mättad
- Förekomsten av förångning/ångtransport medför i sig inte saltutfällning.
  - För att detta ska ske krävs att merparten av det inflödande vattnet avgår som ånga och lämnar systemet