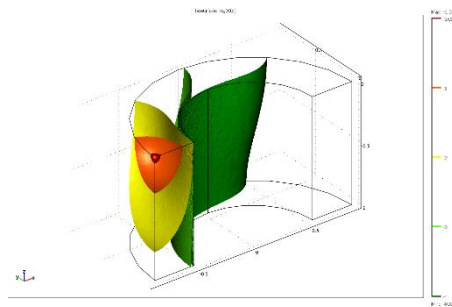


TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

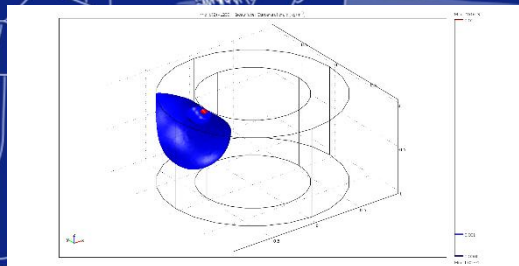
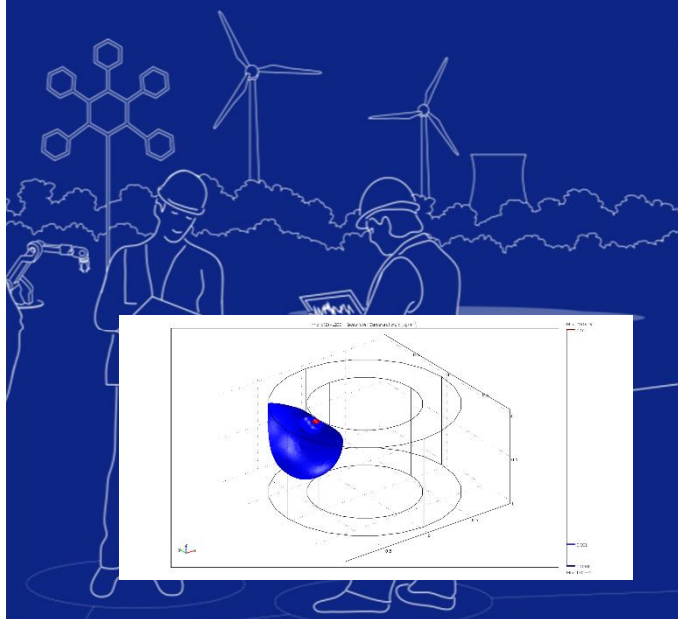


# Skenaarioita mikrobien vaikutuksesta bentoniitin turvallisuustoimintoihin

Ydinjätteen loppusijoituksen mikrobiologia  
KYT2018-seminaari 24.4.2018, Otaniemi, Espoo  
Markus Olin

# Sisältö

- Bentoniitin turvallisuustoiminnot
- Bentoniitin ”heikot kohdat”
- Skenaarioita
  - Mikrobien tuottama sulfidi aiheuttaa korroosiota
  - Mikrobitoiminta muuttaa bentoniitin rakennetta
  - Mikrobitoiminta voi muuttaa koko loppusijoitustilan kemiaa



# Puskurin turvallisustoimintoja

# Puskurin (bentoniitin) turvallisuustoiminnot

## Posivan määrittely (§)

Puskurin turvallisuustoimintoja ovat:

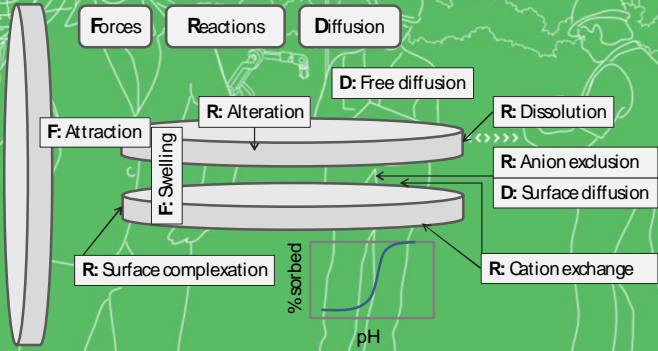
- myötävaikuttaa kapselille suotuisten ja ennustettavissa olevien mekaanisten, geokemiallisten ja hydrogeologisten olosuhteiden muodostumiseen.
- suojata kapseleita ulkoisilta prosesseilta, jotka voisivat vaarantaa käytetyn polttoaineen ja sen sisältämien radionuklidien täydellisen eristämisen teknisten suojarakenteiden avulla.
- rajoittaa ja hidastaa radionuklidien vapautumista kapselin rikkoutuessa.

## Hiukan järjestyksestä

- Vaatimusten hallinta etenee (ideaalisessa prosessissa) ylhäältä alas (tietenkin ajan mittaan iteroiden), joten ensin päätetään sulkea ja eristää jätteet johonkin pakkaukseen (kuparikanisteri), jonka väliin suojaksi kovan kallion väliin tarvitaan puskur
- Sitä ennen on päätetty, että jätepakkaus laitetaan syvään geologiseen kätköön, ja vielä sitä ennen ...
- Tällaisten tarkasteluiden perusteella päädytään turvallisuustoimintoihin, joiden havaitaan täyttyvän, jos puskurimateriaali on (luonnon)bentoniittia
- Ihan näillä termeillä ei operoitu, kun KBS3:n kehitys aloitettiin (\$)

# Turvallisuustoiminnot järjestettynä ja muokattuna tätä esitystä varten

1. Radionuklidit ja korroosiota aiheuttavat aineet liikkuvat bentoniitissa vain molekulaarisella diffuusiolla, joka on hidasta, ja jota vielä hidastaa sorptio osalle alkuaineista – vaikeuttaa kovasti mikrobien ja niiden haittojen (sulfidien) toimintaa
2. Suojata kapseleita ulkoisilta prosesseilta: otetaan tähän kohtaan kalliosiirrokset, joita edesauttaa bentoniitin taipuisuus (mekaaninen vaimennus) – mikrobitoimintaa pyritään estämään suurehkolla bentoniitin tiheydellä, joka vähentää taipuisuutta
3. Kapselille suotuisten ja ennustettavissa olevien geokemiallisten olosuhteiden muodostumiseen – miten ennustaa mikrobien toimintaa?



# Bentoniitin mahdolliset heikot kohdat



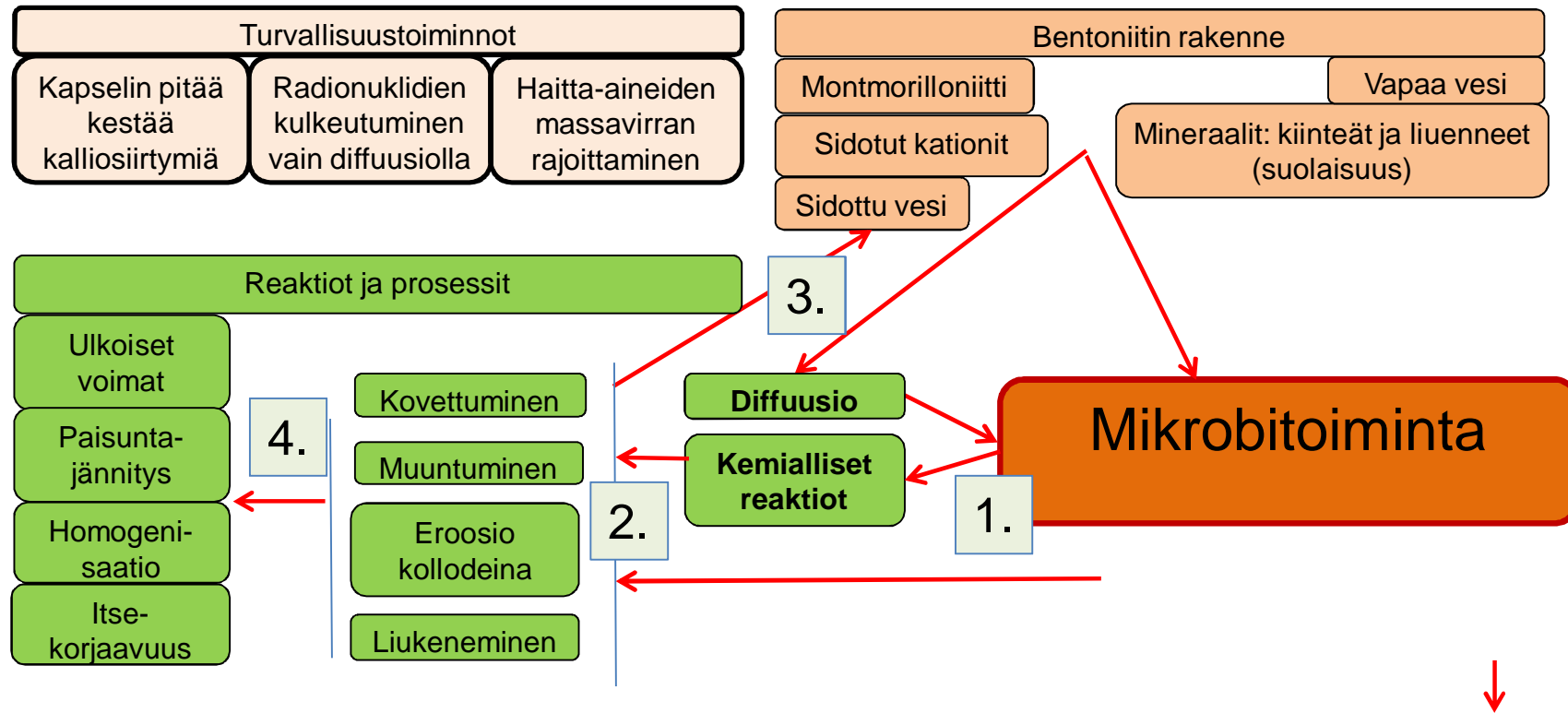
# Kuvitteellinen vertailu: Kivi, kivimurska ja bentoniitti

- Puskurimateriaalin vaatimuksia: alhainen vedenjohtavuus ( $K$ ), hidas diffuusio ( $D_e$ ) ja riittävä mekaaninen taipuisuus
- Graniitti: *pieni*  $K$  ja  $D_e$ , mutta on haurasta, eikä sovi siten puskuriksi
- Kivimurska: *iso*  $K$  ja  $D_e$ , huokoisuus iso, ja olisi helppo käyttää
- Bentoniitti: *pieni*  $D_e$  anioneille, riittävä kationeille, ja hyvin pieni  $K$ , ja taipuisa
- Miten bentoniitti saavuttaa nämä ominaisuudet? Mikä selittää eron kationi-anioni -diffuusiossa? Mikrorakenne: nanomitan huokosia, joissa vuorovaikutus pintojen, joiden ala on suuri, ja huokosveden välillä tehokasta

	Kuivatiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Huokoisuus (-)	Veden johtavuus $K$ (m/s)	$D_e$ Anionit (m <sup>2</sup> /s)	$D_e$ Kationit (m <sup>2</sup> /s)
<b>Kivi</b>	2 650	0.005	1.00E-09	1.00E-13	1.00E-13
<b>Kivimurska</b>	1 600	0.4	1.00E-04	6.00E-11	6.00E-11
<b>Bentoniitti</b>	1 600	0.4	1.00E-12	2.00E-13	8.00E-11

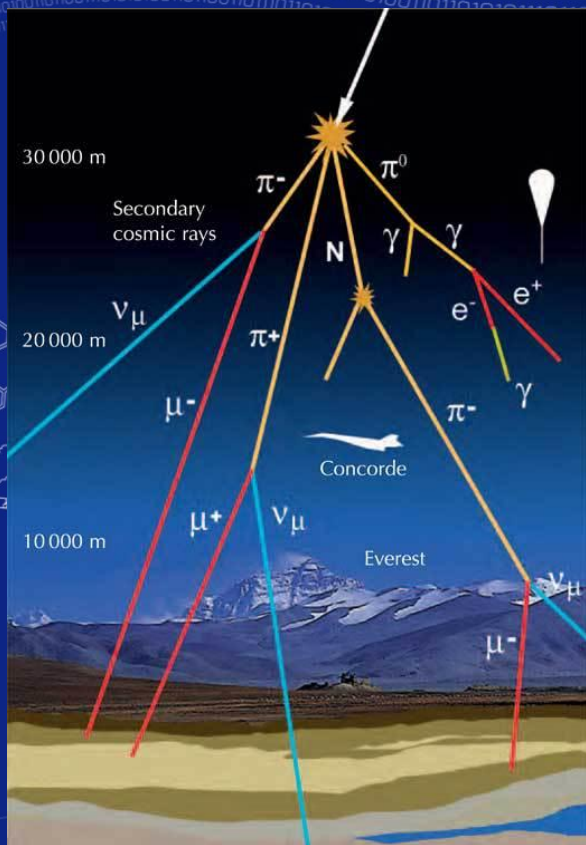


# Mikrobitoiminta, turvallisuustoiminnot ja bentoniitin rakenne ja prosessit



## Bentoniitin ”heikkoja kohtia”

- Rajapinnat vapaan raoissa virtaavan veden ja bentoniitin välissä – tiheys on pieni, eikä suojaa mikrobeilta
  - Mikrobitoiminta alkaa edetä syvemmälle
- Kemiaalliset reaktiot, jotka mahdollistavat muuntumista tai kovettumista
  - joiden seurauksena myös paisuntapaine alenee ja diffuusio tehostuu
- Kemiaallisten olosuhteiden muutos, joka edistää montmorilloniitin liukenemista ja/tai kolloidieroosiota
  - Tiheys alkaa pienetä, diffuusio tehostuu ja mikrobitoiminta voi vilkastua



# Hiukan mahdollisista skenaarioista



# Mikrobien aineenvaihdunta – fyysikon näkökulmasta

- Aineenvaihdunta vaatii
  1. sopivalla etäisyydellä olevia tarvekemikaaleja
  2. energialähdettä, joilla aineenvaihdunta toimii
  3. Haitallisten aineenvaihduntatuotteiden poistamista
- Kohdan 1. suhteen mikrobit lienevät varsin joustavia
- Kohdassa 2. melko uusi idea on se, että elektromagneettisen säteilyn muutkin taajuudet kuin valo voisivat toimia energialähteenä (esim. gammasäteily), jolloin osa mikrobin viihtymisestä säteilyn alla selittyisi tällä eikä pelkästään tehostuneella mutaatiolla (\$)
- Kohta 3. hoituu ehkä helpoiten mikrobin ekosysteemillä

# Sulfidiskenaario, joka on realistinen ja paljon tutkittua

Radionuklidit ja korroosiota aiheuttavat aineet liikkuvat bentoniitissa vain molekulaarisella diffuusiolla...

- Mibrobioimintaa, joka muuntaa sulfaatin sulfidiksi puskurin ulkoreunalla
- Sulfidit ( $\text{HS}^-$  tai  $\text{S}^{2-}$ ) ovat anioneita, joiden diffuusio toimintakykyisessä bentoniitissa on hidasta, ja diffuusio vielä pienentää kuparikapselin pinnalle tulevaa pitoisuutta
- Näitä on laskettu (minäkin), lasketaan ja tullaan laskemaan
- COMSOL MP on mukava työkalu, jolla voi tarkastella myös kaikenlaisia tapauksia, joissa mikrobilähde on lähempänä ja bentoniitin tiheys alentunut

# Mikrobit bentoniittia kovettamassa - kalliosierros

## Suojata kapselleita ulkoisilta prosesseilta...

- Mielenkiintoinen ulkoinen prosessi on kalliosierros, jota vastaan bentoniitti on parempaa, jos tiheys olisi alhaisempi kuin vaaditaan – mikrobitoiminnan rajoittamisen takia
- Mikrobit voisivat edesauttaa reaktioita, joilla montmorilloniitti muuntuu huonommin vaatimukset täyttäväksi tai jotka "liimaavat" montmorilloniitin osaset yhteen (kovettuminen)
- Näyttöä tällaisesta en ole juuri kuullut, mutta tutkimuksia vasta tehdään
  - Epäsuorasti kemiallisia oloja muokkaamalla ilmiö havaittaisiin kemiallisissa muutoksissa mikrobi-bentoniitti –vuorovaikutuskokeissa.
  - Suorassa muutoksessa mikrobeille olisi suotuisaa tuottaa entsyymejä edistämään muutoksia – lienee varsin hankalaa havaita labrakokeissa

# Loppusijoitustilan kemian kontrolli siirtyy mikrobeille

Kapselille suotuisten ja ennustettavissa olevien geokemiallisten olosuhteiden muodostumiseen ...

- Oma kiinnostukseni mikrobitoimintaan alkoi nojatuoliajattelulla, jossa pohdin mikä muu kuin pitkä aikaskaala on kiinnostavaa käytetyn polttoaineen loppusijoituksessa
- Mieleen tuli iso ja lämmitetty tila maan alla, jossa olisi ehkä mahdollista, että mikrobitoiminta alkaa hallita koko tilan kemiallisia olosuhteita – monta estettä matkalla, mutta elämää on luovaa ja aikaakin annetaan
- Lienee vähän tutkittu aihepiiri, ja isompi kuin bentoniitti, johon kuitenkin tällainen kemiallinen muutos saattaisi iskeä – suotuisaan tai haitalliseen suuntaan



**Johtopäätökseni**



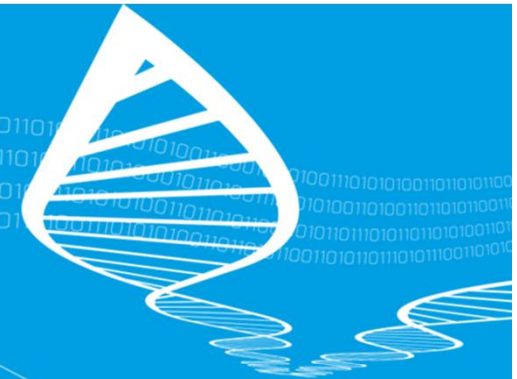
## Johtopäätökseni

- Edellä kerrottu on varsin paljon omaa ajattelua, jota en ole ehtinyt perustamaan tieteellisiin artikkeleihin
- Mikrobitoiminnan laaja-alainen tarkastelu aloitettiin varsin myöhään käytetyn polttoaineen alalla, ja vasta nyt on käynnissä julkisia KYT-hankkeita ja EU MIND
- Uusi ajatuksia ja tutkimustarpeita luultavasti syntyy ja osa uhkista havaitaan haitattomiksi
- Mikrobien luova toiminta on kuitenkin syytä pitää mielessä ja varautua uusiin tutkimuksiin
- Seuraavan kerran EU-rahoitusta mikrobeille tulee varmaan RWMD EJP2 vaiheessa, joten sen suunnitteluun kannattaa vaikuttaa

# KYT2022



- Ehdotuksia uuteen ohjelmaan mikrobitutkimuksista:
  1. Sulfidin muodostumista ja kulkeutumista kannattaa tutkia
    1. MIND ja KYT tuottaneet jo uutta tietoa mikrobeista
    2. Bentoniitin mallinnusta COMSOLilla siten, että diffuusiota voidaan tutkia 3D (monenalaista geometriaa) ja olosuhteita muunnellen
  2. Bentoniitti-mikrobi –vuorovaikutuksen tutkimus on päässyt hyvään alkuun
    1. Bentoniitin muutosten analysointi esim. AFM (Matuszewicz)
    2. MINDista tulleita ideoita käyttöön KYT-hankkeissa
    3. Säteilyn vaikutus mukaan
  3. Mikrobien vaikutus koko loppusijoitustilan kemiaan
    1. Luonnonanalogiat voisi ottaa avuksi



# TEKNOLOGIASTA TULOSTA

