

## **DECOVALEX-PROJEKTI - KYTKETTYÄ TERMO-HYDRO-MEKANIIKKAA KÄYTETYN YDINPOLTTOAINEEN GEOLOGISEEN LOPPUSIJOITUKSEEN**

Esko Eloranta

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 37  
No 3 , 2004, pp. 34-47

### **TIIVISTELMÄ**

Vuosina 1991-2003 on ollut käynnissä kansainvälinen DECOVALEX-projekti, joka liittyy käytetyn ydinpolttoaineen geologiseen loppusijoitukseen. Projekti jakautui kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäinen oli käynnissä 1991-1995, toinen 1995-1999 ja kolmas 1999-2003. Tutkimuksen kohteena ovat olleet kytketyt lämmön, pohjaveden virtauksen ja kiinteän aineen mekaniikan prosessit eli ns. THM (Termo-Hydro-Mekaaniset)-prosessit erilaisissa geologisissa väliaineissa pääpainon ollessa kuitenkin kiteisessä rakoilleessa kallioperässä. Myös saven termo-hydro-mekaanista käyttäytymistä on tutkittu erityisesti bentoniitin osalta. Tutkimusmenetelminä ovat olleet matemaattis-laskennallinen mallinnus ja numeerinen simulointi. Tarkastelu on kattanut laajasti eri aika- ja paikkamittakaavoja alkaen laboratoriomittakaavasta ulottuen aina kymmenien tuhansien vuosien, jopa satojen tuhansien vuosien aikaskaalaan ja alueelliseen mittakaavaan. Kirjoituksessa luodaan katsaus koko 12-vuotiseen DECOVALEX-tutkimukseen ja Suomen kansalliseen osuuteen projektissa.

### **PROJEKTIN TAUSTAA**

Käytetyn ydinpolttoaineen geologinen loppusijoitus tarkoittaa lämpölähteen eli käytettyä ydinpolttoainetta sisältävien kapseleiden upottamista geologiseen rakoilleeseen väliaineeseen. Tästä aiheutuu monenlaisia vaikutuksia ympäröivään kallioon ja sen rakenteeseen sekä siinä esiintyviin luonnollisiin geoprosesseihin, kuten pohjaveden virtaukseen ja aineiden kulkeutumiseen. Kysymys on nimenomaan toisiinsa *kytkeytyneistä* samanaikaisesti vaikuttavista prosesseista. Kytkeytyvät prosessit tarkoittavat erityisesti sitä, että jokin prosessi käynnistää jonkin toisen prosessin ja vaikuttaa siihen. Käytetyn ydinpolttoaineen geologista loppusijoitusta on maailmalla tutkittu aktiivisesti jo 1970- ja eritoten 1980-luvulta alkaen. Kytkeytyvät prosessit tiedostettiin tärkeäksi tutkimusta kaipaavaksi aiheeksi jo varsin varhaisessa vaiheessa (Tsang 1987).

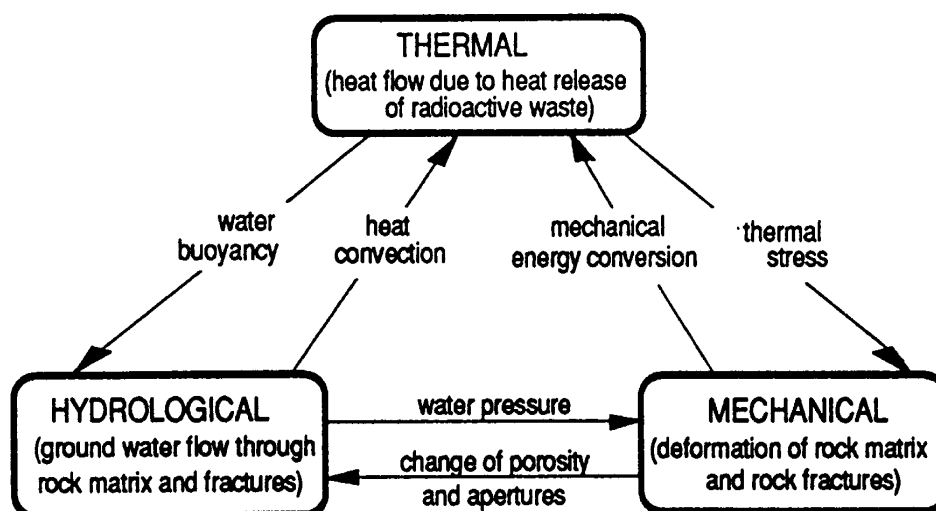
Yhdeksi merkittäväksi ongelmaksi aiheen tutkimisessa on osoittautunut eri tieteenaloilta tulevien henkilöiden ajatusten yhteensovittaminen. Kytkeytyjä prosesseja kun ei pystytä tutkimaan vain yhden tieteenalan puitteissa. Näin ollen kytkeytyjä prosesseja tutkivien tuli ennakkoluulottomasti laajentaa osaamisaluettaan sekä oppia toimimaan yhteistyössä erilaisista tutkimuskulttuureista tulevien kanssa. Ajatus kytkeytyjä prosesseja matemaattis-laskennallisen mallinnuksen avulla tutkivasta kansainvälisestä projektista virisi vuonna 1989 Luulajan teknillisen korkeakoulun ja Ruotsin ydinturvallisuusviranomaisen, Statens Kärnkraftinspektionin, (SKI), välisissä

keskusteluissa. Norjassa Loenissa pidettiin kesäkuussa 1990 kansainvälinen kallion rakoilua käsitellyt konferenssi (International Conference on Rock Joints), jossa varsinaisesti kypsä päätös kansainvälisen projektin käynnistämisestä aiheen tiimoilta. Muutamana valmistelevana työkokouksen jälkeen projektilla oli jo muotoiltu sisältö. SKI lähetti projektista kiinnostuneille tahoille kutsun saapua Pariisiin lokakuussa 1991 perustamaan ja käynnistämään DECOVALEX-projekti. Tämä on samalla se ajankohta, jolloin Säteilyturvakeskuksen (STUK) rooli projektissa alkoi. Suomessa oli käyty keuhällä 1991 keskusteluja eri kotimaisten tahojen kanssa ja päädytty siihen, että Säteilyturvakeskus voisi osallistua projektiin osana omaa tilaustutkimustoimintaansa. DECOVALEX on kirjainsana eli akronyymi sanoista "DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation".

SKI:llä oli jo ennen DECOVALEXin käynnistymistä kerääntynyt runsaasti kokemusta kansainvälisten projektien organisoimisesta ja toteuttamisesta. Tällaisia projekteja olivat mm. radionuklidien kulkeutumista ja pohjaveden virtausta tutkineet INTRACOIN- (1981-1986) ja HYDROCOIN- (1984-1990) projektit.

## KYTKETYT TERMO-HYDRO-MEKAANISET PROSESSIT

Ennen kuin tarkastelen tarkemmin DECOVALEX-projektia ja Suomen kansallista osuutta siinä, kuvaan mitä itse asiassa projektissa on ollut tarkoitus tutkia. Kytkeytyissä lämmön, veden virtauksen ja kiinteän aineen mekaniikan ongelmissa eli Termo-Hydro-Mekaanisissa (THM) ongelmissa on kysymys toisistaan riippuvien, samanaikaisesti vaikuttavien ilmiöiden tarkastelemisesta. Kuten jo edellä mainittiin, lämpö on hyvin merkittävä erilaisia prosesseja käynnistävä mekanismi käytetyn ydinpolttoaineen geologisessa loppusijoituksessa. Kuvassa 1 esitetään kytkeytyneiden THM-prosessien keskinäistä kaksisuuntaista riippuvuutta.



**Kuva 1.** Kytkeytyvät termiset, hydrauliset ja mekaaniset prosessit rakoilleessa kallioliikenteessä (Jing et al. 1996).

Tavanomainen ja insinööritieteissä jo hyvin vakiintunut aihepiiri on lämpöjännitysten ja niiden aikaansaamien muodonmuutosten laskenta. Lämpö vaikuttaa kalliomatriisiin ja rakojen mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten huokoisuuteen ja rakoavaumiin, joilla puolestaan on vaikutusta kalliiossa ja sen raoissa tapahtuvaan pohjavesivirtaukseen. Pohjavesivirtaus puolestaan kuljettaa lämpöä konvektion avulla. Toisaalta lämpö aikaansaa pohjavedessä nostevirtauksia. Pohjavedellä on myös painetta, jolla on vaikutusta kalliomatriisiin ja rakojen avaumiin. Edelleen kalliomatriisin muodonmuutos tuottaa lämpöä eli mekaanista energiaa muuttuu lämmöksi. Kuvan 1 esittämät prosessit ovat hyvin yleisiä ja niiden kaikkien huomioiminen mallinnuksessa samassa mallissa on tänä päivänäkin erittäin vaativa tehtävä. Niinpä käytännössä kytkentöjä joudutaan höllentämään, jolloin tietyt kytkennät jätetään huomiotta tai ne mallinnetaan erikseen. Esimerkiksi mekaanisen energian lämpökonversio voidaan monesti jättää täysin perustellustikin huomioon ottamatta, koska kallion muodonmuutoksessa on kyseessä useimmiten hyvin hitaasti tapahtuva ilmiö, joka tapahtuu lähes isotermisesti. Prosessissa syntyvä lämpö ehtii siten kuljettua pois.

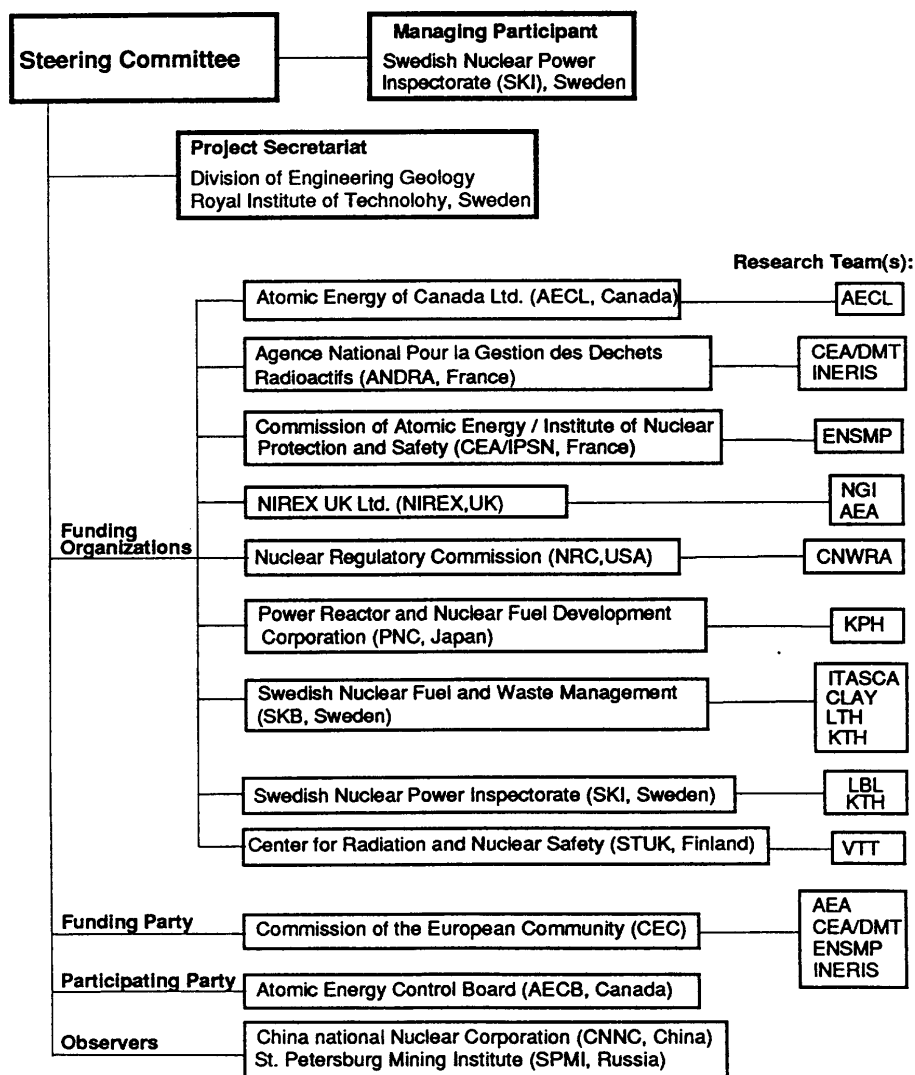
## **PROJEKTIN ORGANISAATIO JA TAVOITTEET**

DECOVALEX-projektin käynnistyessä 1991 siihen osallistui yhdeksän rahoittavaa organisaatiota eri puolilta maailmaa. Rahoittavat organisaatiot (Funding Organizations) muodostivat projektin johtoryhmän (Steering Committee). Rahoittavien organisaatioiden alaisuudessa toimivat varsinaiset tutkimusryhmät (Research Teams). Projektin käytännön koordinoimista varten sille perustettiin sihteeristö (Secretariat), jona toimi teknillisen geologian laboratorio Tukholman teknillisessä korkeakoulussa (Kungl Tekniska Högskolan) ja jonka toimintaa rahoitettiin jäsenmaksujen avulla. SKI toimi johtavana osallistujana (Managing Participant), jonka kautta mm. jäsenmaksujen rahaliikenne tapahtui. SKI hoiti myös projektiraporttien tuottamisen ja painamisen. Kuvassa 2 on esitetty DECOVALEXin alkuvaiheen organisaatiokaavio.

Kuvan 2 kaltainen organisaatio oli myös projektin kahdessa muussa vaiheessa vuosina 1995-1999 (DECOVALEX II) ja 1999-2003 (DECOVALEX III). Vuosien varrella uusia osallistujia tuli mukaan ja joitakin jäi pois, mutta tietty osa alkuperäisistä osallistujista oli mukana koko ajan, eräät tosin nimensä vaihtaneina. Näihin lukeutui myös Säteilyturvakeskus (STUK). STUKin vastuulla oli kansallisen työn koordinoimista. Kuten kuvasta 2 huomataan, osallistujia oli eurooppalaisten lisäksi Japanista, USA:sta ja Kanadasta. Huomattakoon myös, että mukana oli sekä jätteenhuollon vastaavia että viranomaisia. Esimerkiksi Ranskasta on osallistunut useita tällaisia organisaatioita.

Projektin tavoitteet voidaan kiteyttää seuraavasti (Tsang et al. 2003):

- tukea tietokonekoodien kehittämistä ja simulointikoodien luontia THM-mallinnukseen,
- tutkia ja toteuttaa sopivia algoritmeja THM-mallinnukseen,
- verrata mallinnuslaskuja laboratorio- ja kenttäkokeiden tuloksiin,
- suunnitella uusia kokeita tukemaan koodien kehittämistä ja
- tutkia THM-mallinnuksen soveltamista loppusijoitustilan toimintakyky- ja turvallisuusanalyysissä.



**Kuva 2.** DECOVALEX-projektin organisaatio 1991-1995 (Jing et al. 1996).

Projektin yhtenä keskeisenä ajatuksena on ollut siis tietokonemallinnuksessa tarvittavien koodien ja algoritmien kehittämisen tukeminen. Varsinaisia omia "DECOVALEX-koodeja", joita eri tutkimusryhmät olisivat yhteisesti käyttäneet, ei ole kuitenkaan syntynyt. Lähtökohtana on ollut, että kukin tutkimusryhmä käyttää käytössään olevia omia tai kaupallisia koodeja ja kehittää niitä. Tuloksia vertaamalla voidaan sitten oppia toisten tutkimusryhmien käyttämistä mallinnustekniikoista. DECOVALEX-projekti on nimenomaan keskittynyt laskennalliseen mallinnukseen, jossa sekä matemaattinen analyysi että numeerinen matematiikka ovat keskeisiä osaamisalueita.

Projektiin ovat kuuluneet kiinteästi workshopit eli työkokoukset, joita on järjestetty tavallisesti kaksi kertaa vuodessa eri organisaatioiden toimesta. Kukin rahoittajaorganisaatio on toiminut vuorollaan workshopin isäntänä ja huolehtinut sen järjestelystä. Workshoppeja on toteutettu siten kussakin osallistujamaassa ainakin kerran.

Säteilyturvakeskuksen tutkimusryhmänä toimi DECOVALEX I:ssa aluksi VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio ja sittemmin VTT:llä tehdyn organisaatiomuutoksen jälkeen VTT Yhdyskuntatekniikka, joka jatkoi STUKin tutkimusryhmänä myös DECOVALEX II:ssa. DECOVALEX III:ssa STUKin tutkimusryhmänä toimi aluksi Teknillisen korkeakoulun mekaniikan laboratorio, joka sittemmin sulautettiin osittain matematiikan laitokseen ja osittain fysiikan laboratorioon. Varsin pian fysiikan laboratoriossa tehtiin uusi työnjako, jonka seurauksena STUKin tutkimusryhmänä toimi matematiikan laitoksen lisäksi samaisen korkeakoulun rakenteiden mekaniikan laboratorio. Lisäksi Uppsalan yliopistossa Ruotsissa toimi yksi tutkimusryhmä, joka oli yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun kalliotekniikan laboratorion kanssa.

## **KANSALLINEN DECOVALEX -RYHMÄ**

DECOVALEX-projektin käynnistyessä vuonna 1991 oli selvää, että Suomen kokoisesta maasta vain yhden organisaation oli järkevää osallistua projektiin rahoittavana organisaationa. Kuten alussa jo kerrottiin, Säteilyturvakeskus oli valmis ottamaan projektin kansallisen koordinoinnin ja hoitamaan SKI:lle suoritettavan jäsenmaksun. Jotta projektista ei tulisi kuitenkaan vain Säteilyturvakeskuksen omia tutkimuspyrkimyksiä palveleva projekti, päätti Säteilyturvakeskus perustaa ns. *kansallisen DECOVALEX -ryhmän*, jonka tärkeimpänä tehtävänä oli koota yhteen kytketyistä termo-hydro-mekaanisista ilmiöistä kiinnostuneet tahot kotimaassa ja välittää tietoa kansainvälisestä projektista kansallisille tahoille. Tällainen ryhmä perustettiin tammikuussa 1992.

Ryhmään ovat saaneet vapaasti tulla mukaan kaikki asiasta kiinnostuneet. Niinpä siinä on ollut edustajia STUKin lisäksi tutkimuslaitoksista, yliopistoista ja korkeakouluista, kalliorakennuksen insinööri- ja konsulttitoimistoista sekä tärkeänä osallistujana myös jätteen loppusijoituksesta vastaava taho. Näin tieto on saatu tehokkaasti siirtymään tutkijoilta loppukäyttäjille. Lisäksi vuorovaikutus ja avoin keskustelu eri tahojen kesken ovat olleet omiaan terävöittämään kansallista tutkimustamme. Enimmillään osallistujia ryhmässä on ollut parikymmentä henkilöä.

Kokouksia on järjestetty muutama vuosittain, useimmiten juuri ennen kansainvälisiä workshopeja. Kokouksia on pidetty eri ryhmään osallistuvien organisaatioiden isännöiminä, ja näin on päästy myös paikan päälle tutustumaan vuorollaan kuhunkin organisaatioon.

## **BENCH MARK TESTIT JA TEST CASET**

Tutkimusryhmissä tehtiin varsinainen tutkimustyö simuloimalla johtoryhmän vahvistamia simulointitestejä. Testejä on ollut useita. Ne ovat olleet joko ns. Bench Mark Testejä (BMT) tai Test Casejä (TC). Bench Mark Testit ovat luonteeltaan hypoteettisia tilanteita, joita käytetään kytkettyjen THM-prosessien käyttäytymisen mallinnuksessa eri aika- ja spatiaaliskaaloissa tavoitteena loppusijoitustilan toimintakykyyn liittyvien ilmiöiden kvantitatiivinen arvioiminen. Käytössä on ollut erilaisia vaihtoehtoisia konseptuaalisia ja numeerisia malleja. Test Caset ovat

laboratorio- tai kenttäkokeita, joita analysoitiin ymmärryksen lisäämiseksi THM-prosesseista ja joiden dataa voitiin käyttää jonkin mallin ominaisuuksien tutkimisessa ja mallien validoinnissa sekä tietokonekoodien verifiointissa. Jotkut Test Caseit ovat olleet laajoja täydenmittakaavan kokeita ja kestoiltaan useita vuosia, mutta mukana on ollut myös lyhytkestoisia laboratoriokokeita (Tsang et al. 2003).

Bench Mark Testeistä ja Test Caseistä on formuloitu vastaavat alku- ja reuna-arvotekijät, joissa on otettu huomioon siis termiset, hydrauliset ja mekaaniset alku- ja reunaehdot. Testien määrää on rajoitettu, jotta samaa testiä simuloi useampi tutkimusryhmä.

DECOVALEX I -projektissa vuosina 1991-1995 tutkittiin kolmea Bench Mark Testiä ja peräti kuutta Test Casea, joissa kolmesta kyseessä oli laboratoriomittakaavan koe kiviläpistä ja niiden rakoista sekä loput kolme laaja-alaisia kenttäkokeita. DECOVALEX I -projekti jakautui edelleen kolmeen vaiheeseen. Yksi Bench Mark Test koski ns. KBS-3-konseptin mukaista loppusijoituskonfiguraatiota. Tätä testiä esittelen lisää tuonnempana, koska se muodosti myös yhden Suomen kannalta mielenkiintoisen tapauksen, jonka simuloimisiin osallistuimme ja jonka pohjalta muotoutui työmme myös DECOVALEX II -projektissa. Bench Mark Testeistä ja Test Caseistä sekä DECOVALEX I -projektin eri vaiheista löytyy lisätietoa lähteissä (Jing et al. 1993), (Jing et al. 1994), (Jing et al. 1995) sekä (Jing et al. 1996). Lisäksi DECOVALEX I -projektin tuloksista on julkaistu kirjakin (Stephansson et al. 1996) sekä erikoisnumero "International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences" -lehteen (Stephansson 1995). Kansallinen osuutemme on raportoitu lähteessä (Eloranta 1996).

DECOVALEX I -projektin loppupuolella aloimme suunnitella laboratoriossa tehtävää puristuskoetta kiviläpällä, jonka halkaisee yksi ainut rako. Kokeesta toteutettiin tiettyjä hydro-mekaaniseen (HM) kytkeeseen liittyviä osia Teknillisen korkeakoulun kallioteknikan laboratoriossa olevalla puristinlaitteistolla (MTS 815) (Pöllä et al. 1996). Tätä työtä varten suunniteltiin tehtäväksi myös näytteen sähköjohtavuusmittauksia (Mursu & Peltoniemi 1995), joiden avulla näytteen huokoisuutta olisi voitu arvioida kokeen kestäessä. Täydellistä THM-puristuskoetta ei kuitenkaan koskaan tehty. Koe olisi vaatinut huomattavan rahallisen panostuksen, johon ei valitettavasti muita kansainvälisiä rahoittajia saatu osallistumaan. Puristinkokeen osatulosten analysointi siirrettiin tehtäväksi DECOVALEX II -projektissa osana kansallista panostamme siinä.

DECOVALEX II -projektissa vuosina 1995-1999 keskityttiin kahteen suureen laaja-alaiseen *in situ* -kokeeseen sekä selvitettiin, miten projektissa tuotettua osaamista voidaan soveltaa loppusijoitustilan toimintakyky- ja turvallisuusarvioinnissa. Projekti jakautui neljään tehtävään (Task). Nämä olivat:

- Task 1: Sellafieldin Rock Characterization Facilityn numeerinen tutkimus. Brittiläinen jätevästava NIREX suunnitteli Sellafieldiin täydenmittakaavan maanalaista karakterisointitilaa, jossa keskeisenä elementtinä olisi ollut muutaman sadan metrin syvyyteen ulottuva pystysuora kuilu.
- Task 2: Japanilaisessa Kamaishin kaivoksessa tehdyn bentoniittikokeen numeerinen simulointi.
- Task 3: Kalliorakojen konstitutiivisten mallien kehittäminen ja state-of-art-katsauksen tekeminen niistä.

- Task 4: Kytettyjen THM-prosessien merkitys loppusijoitustilan suunnittelussa ja toimintakyvyn arvioinnissa.

Taskien 1, 2 ja 4 tulokset on koottu mm. "International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences" -lehden erikoisnumeroon (Stephansson 2001). Näistä Taskeista on tuotettu myös erilliset tutkimusraportit (Jing et al. 1998a), (Jing et al. 1998b), (Jing et al. 1999a), (Jing et al. 1999b), (Jing et al. 1999c) sekä (Stephansson et al. 1999).

Task 1:ssa käytettiin hyvin laajaa lähtödata-aineistoa, joka käsitti Sellafieldin alueen geologiaa, hydrogeologiaa ja kalliomekaniikkaa. Tutkimusryhmät saivat itse päättää, mitä dataa he ottivat käyttöön ja miten he jatkojalostivat sitä omiin malleihinsa sopivaksi. Näin ollen Taskin suorittaminen pohjautui todellisen data-aineiston käyttöön. Siinä suhteessa sitä on pidettävä hyvänä harjoituksena. Valitettavasti kuitenkin koskaan kyseistä karakterisointitilaa ja siihen liittyvää tutkimuskuilua ei rakennettu, joten simulointituloksia ja mallinnuskonseptualisointeja voitiin verrata vain eri ryhmien välillä.

Task 2:ssa saatiin arvokasta tietoa lähialueen kytketystä THM-problematiikasta bentoniitin osalta. Task 4 tuotti tärkeän referenssin, jossa hyödynnettiin myös Dr. John Hudsonin kehittämää auditointijärjestelmää (Stephansson et al. 1999). Task 3:ssä tarkasteltiin olemassa olevia konstitutiivisia rakomalleja ja niiden kehittämistarpeita. Suomessa osallistuimme aluksi Task 3:n työskentelyyn analysoimalla Teknillisen korkeakoulun kallioteknikan laboratoriossa olevalla puristimella tehtyä koetta sekä tuottamalla tietoa konstitutiivisen mallin kehittämiseksi (Vuopio & Pöllä 1997, Niemi 1999). DECOVALEX II -projektin jälkimmäisellä puoliskolla osallistuimme myös Task 1:een eli Sellafieldin kuilun simulointeihin (Eloranta 2000).

DECOVALEX III -projektissa vuosina 1999-2003 oli neljä tehtävää (Task):

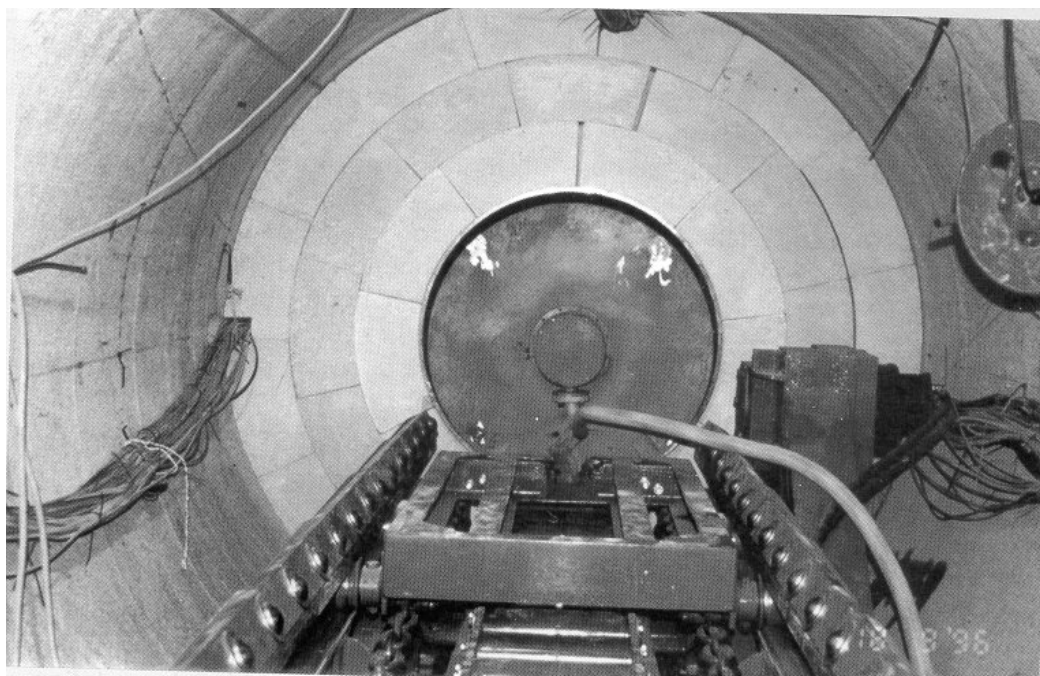
- Task 1: FEBEX-koe. Sveitsissä Grimselin kalliolaboratoriossa oli toteutettu espanjalaisen ENRESAn toimesta täydenmittakaavan bentoniittikoe.
- Task 2: Yucca Mountainissa, USA:ssa Nevadan osavaltiossa, oli tehty täydenmittakaavan lämmityskoe, ns. Drift Scale Test.
- Task 3: Tehtävä jakautui kolmeen Bench Mark Testiin: (1) BMT1 - loppusijoitustilan sulkemisen jälkeen tapahtuva saturoituminen, (2) BMT2 - rakoilleen kallion hydraulisten ja mekaanisten ominaisuuksien skaalautuminen eri mittakaavojen välillä ja (3) BMT3 - jäätiköityminen ja ikirouta.
- Task 4: THM-prosessit loppusijoitustilan toimintakykyanalyyseissä.

Täydenmittakaavan FEBEX-kokeessa lämmitettiin vaakasuoraa kahdesta peräkkäisestä lämmityssylinteristä ja niitä ympäröivistä bentoniittilohkoista muodostunutta systeemiä (kuva 3). Kuvan vaakasuoran ympyränmuotoisen tunnelin halkaisija on n. 2,3 m ja pituus yli 70 metriä. Lämmityskokeen kaksi sylinteriä olivat instrumentointineen yhteispituudeltaan n. 10 m. Kokeeseen kuului lämmitysvaiheen lisäksi myös pitkä jäähtyysvaihe, jonka jälkeen bentoniittilohkot poistettiin. FEBEX-projektin tarkoituksena on ollut mm. demonstroida bentoniittilohkoista muodostettavan radionuklidien kulkeutumiseen rakentamista todellisissa olosuhteissa. Projekti on varsinaisesti ollut EU-projekti, josta tosin tietty matemaattista mallinnusta koskeva osa irrotettiin DECOVALEX III -projektiin. FEBEX-kokeessa on tuotettu valtava määrä monitorointitietoa jännitysten, muodonmuutosten, bentoniitin vesisisällön sekä veden paineen ja lämpötilan jakaumista. Myös bentoniitin ja kallion välinen rajapinta on ollut tutkimuksen kohteena.

Suomessa Teknillisen korkeakoulun matematiikan laitos on osallistunut FEBEX-kokeen simuloiteihin laatimalla bentoniitille yleisiin kontinuumimekaniikan ja termodynamiikan periaatteisiin pohjautuvan kytketyn termo-hydro-mekaanisen mallin.

STUKin tutkimusryhmistä Uppsalan yliopistossa toiminut geohydrologian ryhmä teki simuloiteja Task 3:n Bench Mark Test 2:n tiimoilta. Kysymyksessä on homogenisointiongelma, joka koskee riippuvuutta ekvivalentin kontinuumin ja diskreetin, erillisistä raoista koostuvan kallioväliaineen välillä. Kysymys on kallion ominaisuuksien ekstrapoloinnista laboratoriomittakaavan testeistä loppusijoitustilan mittakaavaan.

Keskeistä on ollut skaalautumiseen liittyvien epävarmuuksien tarkastelu. BMT2:ssa on käytetty Sellafieldin data-aineistoa, samaa, jota käytettiin DECOVALEX II -projektin Task 1:ssä. Kalliomekaaniset simuloinnit on tehty UDEC-koodilla Teknillisen korkeakoulun kalliotekniikan laboratoriossa.



**Kuva 3.** FEBEX-kokeen lämmitin bentoniittilohkojen ympäröimänä.

Suomi osallistui myös jäätiköitymistä ja ikeroutaa tutkivaan Bench Mark Test 3:een. Itse asiassa ikeroudan mallinnuksen mukaanotto kansainväliseen projektiin tapahtui STUKin ehdotuksesta. BMT3:ssa kysymyksessä on jäätiköitymiseen ja ikeroudan muodostumiseen liittyvien kytkettyjen hydro-mekaanisten prosessien tarkastelu. Tämä on sekä aika- että spatiaaliskaalassa laajin probleemi, mitä DECOVALEXien puitteissa on tutkittu. Aikaskaala ulottuu aina 100.000:een vuoteen ja spatiaaliskaala kymmeneen, jopa satoihin kilometreihin. Suomen tutkimustyöstä on vastannut Teknillisen korkeakoulun rakenteiden mekaniikan laboratorio.

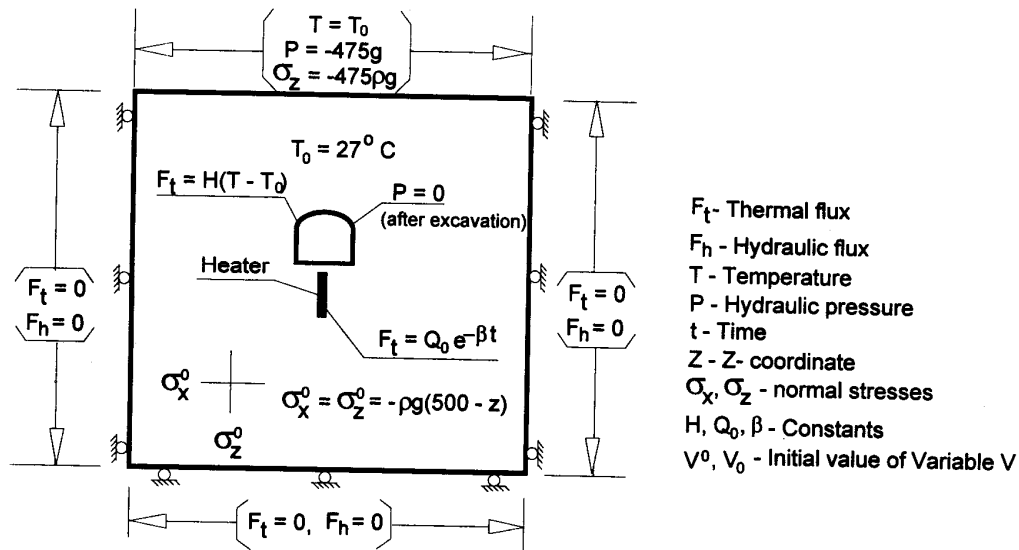
Task 4 on liittynyt kytkettyjen prosessien turvallisuusmerkityksen arviointiin. Se on ollut jatkoa DECOVALEX II -projektissa käynnistyneelle työlle.



DECOVALEX III -projektin loppuraportointi on edelleen käynnissä. Raportit julkaistaan SKI:n tutkimusraporttisarjassa. Kansallisesta osuudestamme on tavoitteena tuottaa myös yhteenvetoraportti STUKin raporttisarjaan. Tästä syystä tässä kirjoituksessa ei tarkastella yksityiskohtaisemmin DECOVALEX III:n tutkimuksia ja niiden tuloksia. Aiheesta kiinnostuneet voivat löytää lisätietoa myös DECOVALEX-projektin kotisivulta [www.decovalex.com](http://www.decovalex.com). Projektin aikaansaannokset muodostivat merkittävän osan lokakuussa 2003 Tukholmassa järjestetyssä kytkettyjä prosesseja käsitelleessä kolmipäiväisessä GeoProc 2003 -konferenssissa, jonka kokousjulkaisu eli proceedings on määrä julkaista omana kirjanaan.

## ESIMERKKI YHDESTÄ OPETTAVAISESTA BENCH MARK TESTISTÄ

Seuraavassa esitän yhden tapauksen, johon suomalaiset tutkijat osallistuivat DECOVALEX I -projektin aikana. Kysymyksessä on DECOVALEX I -projektin BMT3, joka on runsasrakoiseen kalliioon tehty ns. KBS-3-konseptin mukainen loppusijoitustilan tunneli ja sen pohjassa oleva kapseli (Jing et al. 1994). Kapseli toimii lämpölähteenä, jonka teho laskee eksponentiaalisesti ajan funktiona.

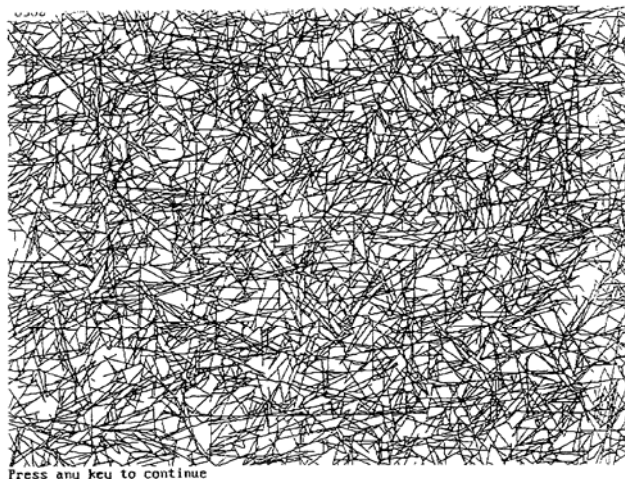


**Kuva 4.** Loppusijoitustilatunneli ja lämpölähte sekä probleemin reuna- ja alkuehdot (Jing et al. 1996).

Kuvassa 4 on esitetty geometria sekä reunaehdot. Probleemi käsiteltiin kaksidimensionaalisen tasomuodonmuutoksena. Mallin dimensiot ovat 50 m x 50 m ja se sijaitsee 500 m maanpinnan alapuolella. Malli upotetaan rakoilleeseen kalliioon. Rakoverkossa on 6580 rakoja, joka vastaa todellista Ruotsissa sijainneen, jo toimintansa lopettaneen Stripan kaivoksen kolmidimensionaalista rakodata-aineistoa (kuva 5). Probleemi on täysin kytketty termo-hydro-mekaaninen lähialueen ongelma. Lämpölähteen aikakäyttäytyminen vastaa radioaktiivisen hajoamisen tuottamaa lämpölähdettä käytetyssä ydinpolttoaineessa. Itse kivimatriisi oletetaan ominaisuuksiltaan isotrooppiseksi ja elastisilta ominaisuuksiltaan lineaariseksi. Liioin

mekaanisten ominaisuuksien lämpötilariippuvuutta ei ole otettu huomioon. Myös lämmönjohtavuus ja lämpölaajeneminen oletetaan isotrooppisiksi.

Raot oletetaan tasomaisiksi ja sileistä, yhdensuuntaisista pinnoista koostuviksi. Jotta probleemista tulee ratkaistavissa oleva, rakojen määrää joudutaan huomattavasti vähentämään ja tilannetta idealisoimaan. Probleemin ratkaiseminen edellyttää tietenkin myös termisten, mekaanisten ja hydraulisten alku- ja reunaehtojen asettamista. Ehdot käyvät ilmi kuvasta 4.



**Kuva 5.** Simulointien pohjana ollut alkuperäinen Stripan kaivoksen rakokuvio, jossa on 6580 rakoja (Jing et al. 1996).

Kuvassa 6 on mainittu eri tutkimusryhmien käyttämät laskentakoodit sekä ryhmien tekemät yksinkertaistukset rakokuvioon. Kuvasta ilmenee myös ryhmien käyttämä rakogeometria.







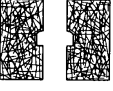

Tämän BMT:n simulointituloksista voitiin tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- Lämpötilakenttien yhteensopivuus eri tutkimusryhmien tuloksissa oli hyvin samansuuntainen. Erot eri ryhmien tuloksissa eivät olleet merkittäviä.
- Lämmön konvektiolla todettiin olevan vähäinen merkitys lämpötilakenttään.
- Siirtymissä oli jo hajontaa eri ryhmien tulosten välillä sekä jatkuvan että diskreetin mallinnustavan välillä. Erityisesti lähellä tunnelin ja loppusijoitusreiän reunoja tuloksissa oli huomattaviakin eroavaisuuksia.
- Jännityskenttätuloksissa oli suurehko hajonnat eri ryhmien tulosten välillä. Näin erityisesti lähellä lämpölähdettä ja tunnelin reunaa.
- Virtaamatulokset olivat hyvin suuresti poikkeavia eri ryhmien kesken. Näin oli sekä jatkuvan että diskreetin mallinnustavan tuloksissa.

BMT3:n simuloinnit opettivat eri tutkimusryhmille paljon, kun tuloksia verrattiin keskenään. Yleinen huomio oli siis, että lämpötilakenttä pystytään ennustamaan suhteellisen luotettavasti. Ainakin eri ryhmien laskemat tulokset olivat hyvin yhtäpitäviä. Sen sijaan kallion jännityskentän ja siirtymien laskelmissa eroja eri ryhmien välillä oli huomattavasti, kuten myös veden virtauksen laskennoissa. Suomessa VTT:n tutkimusryhmä käytti laskennoissaan UDEC-koodia.

BMT3 oli hyvin määritelty lähialueen ongelma, jonka relevanssi loppusijoituksen kannalta on huomattava. Kyseessä on samanlainen kapselin loppusijoituskonfiguraatio, jota Suomessakin on suunniteltu käytettävän. Siksi nimenomaan tämä tutkittu BMT oli Suomen kannalta hyvin tärkeä ja mielenkiintoinen.

Esitetty tapaus viritti joukon uusia kysymyksiä. Yksi liittyi juuri rakojen konstitutiivisiin malleihin, mitä työtä Suomessa päätettiin tehdä. Tähän liittyi Teknillisen korkeakoulun kalliotekniikan laboratorion puristimella tehty alustava koe, jossa hydraulista ja mekaanista kytkentää tarkasteltiin ja jonka tuloksia simuloitiin numeerisesti (Pöllä et al. 1996).

<b>AEA (NAPSAC code, DFN model)</b> Complete and explicit representation of 6580 fractures by DFN method, without heat and rock deformation, but with analytical model for stress approximation	
<b>CEA/DMT (CASTEM 2000 code, FEM model)</b> Equivalent continuum approach with FEM method (1344 elements, 4216 nodes), homogenization (scale 25 x 25 meters) by Crack Tensor theory (Oda, 1986)	
<b>CNWR (UDEC code, DEM model)</b> Vertical symmetry and simplified fracture network with 295 fractures, 337 blocks, 1540 finite difference elements, and 10853 nodes. A small inner region with random fractures and larger outer region with regular artificial fractures	
<b>ITASCA (FLAC code, FDM model)</b> Equivalent continuum approach with FDM (735 finite difference elements and 792 nodes) without formal homogenization. Vertical symmetry and inhomogeneous permeability	
<b>INERIS (UDEC code, DEM model)</b> Simplified fracture network with inner region of random fractures and outer regions of regular artificial fractures (564 fractures, 677 blocks, 24391 finite difference elements, and 16791 nodes)	
<b>KPH (THAMES code, FEM model)</b> Equivalent continuum approach with FEM method (674 elements, 2127 nodes). Homogenization (scale 10 x 10 meters) by Crack Tensor theory (Oda, 1986). Heat convection considered	
<b>NGI (UDEC code, DEM model)</b> Two models of vertical symmetry (one left half and one right half) with simplified fracture network without heating, about 512 fractures, 510 blocks, and 1580 finite difference elements	
<b>VTT (UDEC code, DEM model)</b> Vertical symmetry (left half) with simplified fracture network, 814 fractures, 496 blocks, 1308 finite difference elements, and 2222 nodes.	

**Kuva 6.** Eri tutkimusryhmien käyttämät koodit ja tehdyt yksinkertaistukset rakokuvioon DECOVALEX I -projektin BMT3:ssa (Jing et al. 1996).

## ARVIOTA DECOVALEXIN MERKITYKSESTÄ

DECOVALEX-projektisarjan merkitys ymmärryksen tuottajana kytketyistä termo-hydro-mekaanisista prosesseista ja niiden laskennallisesta mallinnuksesta on huomattava. Vaikka tutkittava problematiikka ei olekaan pelkästään käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen liittyvä, on po. sovellusalueen merkitys aiheen teoreettis-laskennallisessa tutkimisessa kuitenkin huomattava. Muita tieteen ja teknologian alueita, jotka tarkastelevat kytkettyjä ongelmia on lukuisa määrä, esimerkiksi geodynamiikka, vulkanologia, öljy- ja kaasuteollisuus, geotekniikka, ympäristötekniikka, rakennustekniikka, palotekniikka jne. Kullakin alueella on omat erityiskysymyksensä, mutta teoreettisilta perusteiltaan eri alojen mallit ovat aika lailla samanlaisia. Niinpä eri alueilla työskentelevillä on paljonkin toisilleen annettavaa ja toisiltaan opittavaa. Tämä tuli erittäin selvästi esille lokakuussa 2003 Tukholmassa järjestetyssä kansainvälisessä GeoProc 2003 -konferenssissa, jonka aiheena oli kytketyt termo-hydro-mekaanis-kemialliset prosessit geosysteemeissä, alaotsikkoina perusteet, mallinnus, kokeet ja sovellukset.

Suomessa DECOVALEX-projektin eri vaiheiden kansalliset kontribuutiot ovat tarjonneet merkittävän koulutustarjonnan ja jatko-opintoaiheen muutamalle nuorelle tutkijalle. Projekti on tuonut selkeästi ilmi teoreettisen osaamisen vaatimattoman tason eritoten kalliotekniikan piirissä. Sananmukaista varsinaista *kalliomekaniikkaa* osaavat ovat meillä valitettavan harvassa. Kalliomekaniikka nähdään Suomessa ehkäpä liiaksi kalliorakennustekniikkaan kuuluvaksi aiheeksi, mitä se eittämättä onkin. On kuitenkin syytä muistaa, että kalliomekaniikalla on vahvat teoreettiset juurensa erityisesti *mekaniikassa*. Kyseessä on kiven ja maankamaran fysiikkaan liittyvä tutkimusalue. Näin ollen kalliomekaniikan tieteellisen tutkimuksen lähtökohdaksi on täysin perusteltua valita yleiset mekaniikan periaatteet. Usein ajatellaan, että kallioväliaineen rakoillut, diskreetti sekä vahvasti epähomogeeninen ja anisotrooppinen luonne tekisi siitä jotenkin mahdottoman käsitellä esimerkiksi kontinuumimekaniikan teorioilla. Ne ovat kuitenkin tärkeä lähtökohta, kun kallion mekaanista käyttäytymistä tarkastellaan osana kytkettyjä prosesseja. Kalliomekaniikassa olisikin muistettava painottaa siten myös sen jälkimmäistä eli mekaniikkaan kuuluvaa osaa.

Nykyisin insinöörienkin keskuudessa yleistynyt matematiikkafobia ei saa johtaa tämänkaltaisen tutkimuksen laiminlyöntiin ja vähättelyyn, vaan teoreettisille matemaattispainotteisille asioille tulee olla hyvin tilaa ja aikaa yliopisto- ja korkeakoulutasoisissa kalliomekaniikan opetuksessa, muistaen lisäksi samalla kytkennät eritoten termisten ja hydraulisten ilmiöiden kanssa. Tämä olkoon DECOVALEXin yksi viesti opetusohjelmia suunnitteleville ja niistä päättävälle.

Tätä kirjoitettaessa näyttää varsin varmalta, että DECOVALEX-projektisarja tulee jatkumaan kolmivuotisella DECOVALEX IV -nimisellä projektilla vuosina 2004-2006. Alustavat kaavailut liittyvät mm. louhinnan häiriövyöhykkeen, ns. EDZ (Excavation Disturbed Zone), tutkimuksiin, joissa mukaan otettaisiin THM-kytkennän lisäksi sekä kemiallinen kytkentä (THMC) että monifaasivirtaukset. Myös jäätiköitymis- ja ikeroutatutkimusta on ehdotettu jatkettavaksi. Loppusijoitustilan lähialueen ilmiöt olisivat muutoinkin tärkeällä sijalla niiden turvallisuusmerkityksen takia. Suomen mahdollinen osallistuminen projektiin on kuitenkin vielä täysin avoin.

## **KIITOKSET**

Kiitän kaikkia DECOVALEX-projektin eri vaiheiden kansalliseen tutkimukseen vuosien varrella osallistuneita tutkijoita sekä kansallisen ryhmän jäseniä hyvästä yhteistoiminnasta ja merkittävästä kontribuutiosta kansainväliseen projektiin. Suomen tutkimustyö on rajattu aina tarkoituksellisesti tiettyihin erityiskysymyksiin, joihin resurssimme ovat riittäneet. Työmme on tullut tästä huolimatta tai kenties juuri siitä syystä kansainvälisesti huomioituksi ja olemme saaneet siitä pääasiassa hyvin positiivista palautetta. Kiitän myös ulkomaalaisia kollegojani ja tutkijoita uusia ajatuksia tarjoavan kokousilmapiirin luomisesta workshopeissa sekä vuorovaikutuksesta maailman johtavien kytketyn mallinnuksen asiantuntijoiden kanssa.

## KIRJALLISUUSVIITEET

- Eloranta, E. (ed.), 1996. The international DECOVALEX project for the modelling of coupled Thermo-Hydro-Mechanical processes in a nuclear waste repository. The Finnish contributions during 1991-1995. STUK-YTO-TR 113, Säteilyturvakeskus, Helsinki.
- Eloranta, E. (ed.), 2000. DECOVALEX II. The summary report of the Finnish contributions 1995-1999. STUK-YTO-TR 163, Säteilyturvakeskus, Helsinki.
- Jing, L., Rutqvist, J., Stephansson, O., Tsang, C.-F. & Kautsky, F., 1993. DECOVALEX - Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories, report of phase I. SKI Technical Report 93:31, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Jing, L., Rutqvist, J., Stephansson, O., Tsang, C.-F. & Kautsky, F., 1994. DECOVALEX - Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories, report of phase II. SKI Report 94:16, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Jing, L., Rutqvist, J., Stephansson, O., Tsang, C.-F. & Kautsky, F., 1995. DECOVALEX - Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories, report of phase III. SKI Report 95:80, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Jing, L., Stephansson, O., Börgesson, L., Chijimatzu, M., Kautsky, F. & Tsang, C.-F., 1999b. DECOVALEX II Project. Technical Report - Task 2C. SKI Report 99:23, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Jing, L., Stephansson, O., Knight, L., Kautsky, F. & Tsang, C.-F., 1999a. DECOVALEX II Project. Technical Report - Task 1C. SKI Report 99:22, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Jing, L., Stephansson, O., Tsang, C.-F. & Kautsky, F., 1996. DECOVALEX - Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories, Executive summary for phases I, II and III. SKI Report 96:58, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Jing, L., Stephansson, O., Tsang, C.-F., Chijimatsu, M. & Kautsky, F., 1998b. DECOVALEX II Project. Technical Report - Task 2A and 2B. SKI Report 98:40, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Jing, L., Stephansson, O., Tsang, C.-F., Knight, L. & Kautsky, F., 1998a. DECOVALEX II Project. Technical Report - Task 1A and 1B. SKI Report 98:39, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.

- Jing, L., Stephansson, O., Tsang, C.-F., Knight, L. & Kautsky, F., 1999c. DECOVALEX II Project. Executive Summary. SKI Report 99:24, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Mursu, J. & Peltoniemi, M., 1996. Rakoilleen kallion termo-hydro-mekaniikkaa ydinjätetutkimuksia varten. Termo-hydro-mekaaniseen kokeeseen liittyvä sähköjohtavuusmittaus. STUK-YTO-TR 120, Säteilyturvakeskus, Helsinki.
- Niemi, A. (ed.), 1999. Studies on coupled hydromechanical effects in single fractures. . A contribution to DECOVALEX II Task 3 "Constitutive relationships of rock joints". STUK-YTO-TR 151, Säteilyturvakeskus, Helsinki.
- Pöllä, J., Kuusela-Lahtinen, A. & Kajanen, J., 1996. Experimental study on the coupled T-H-M-processes of a single rock joint with a triaxial test chamber. Teoksessa: Stephansson, O., Jing, L. & Tsang, C.-F. (eds), 1996. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media. Mathematical and Experimental Studies. Developments in Geotechnical Engineering, 79, Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Tokyo, s. 449-465.
- Stephansson, O. (Guest ed.), 1995. Special Issue: Thermo-Hydro-Mechanical coupling in rock mechanics. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 32, No. 5.
- Stephansson, O. (Guest ed.), 2001. Special Issue: DECOVALEX II. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38, No. 1.
- Stephansson, O., Hudson, J.A., Tsang, C.-F., Jing, L. & Andersson, J., 1999. DECOVALEX II Project. Coupled THM issues related to repository design and performance - Task 4. SKI Report 99:7, Statens Kärnkraftinspektion, Sweden.
- Stephansson, O., Jing, L. & Tsang, C.-F. (eds), 1996. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media. Mathematical and Experimental Studies. Developments in Geotechnical Engineering, 79, Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Tokyo, 575 s.
- Tsang, C.-F. (ed.), 1987. Coupled processes associated with nuclear waste repositories. Academic Press, San Diego, 881 s.
- Tsang, C.-F., Stephansson, O., Kautsky, F. & Jing, L., 2003. An overview of the DECOVALEX project on coupled THM processes in fractured rock-bentonite systems. GeoProc 2003 Proceedings, Part 1. Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 13-15 October 2003.
- Vuopio, J. & Pöllä, J., 1997. Characterization of the rock joint surface. A contribution to DECOVALEX II Task 3 "Constitutive relationships of rock joints". STUK-YTO-TR 138, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

Esko Eloranta, tekn. tri, dos.

Säteilyturvakeskus  
 PL 14  
 00881 Helsinki  
 E-mail: esko.eloranta@stuk.fi

## **DECOVALEX PROJECT - COUPLED THERMO-HYDRO-MECHANICS FOR GEOLOGICAL DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL**

Esko Eloranta

In the years 1991-2003 there has been going on an international DECOVALEX project which by mathematical modelling studied coupled Thermo-Hydro-Mechanical (THM) effects originating from the disposal of spent nuclear fuel in a geological medium. The main medium studied is fractured hard rock, but also clay has been dealt with, especially bentonite. The project had three phases: 1991-1995, 1995-1999 and 1999-2003. This paper presents an overview of the project and describes the Finnish contributions in the project.